



**Universidade de Aveiro** Departamento de Engenharia Mecânica  
2012

**Paulo Joaquim  
Pires Calejo**

**Sistema conversor de energia das ondas do mar**





**Universidade de Aveiro** Departamento de Engenharia Mecânica  
Ano 2012

**Paulo Joaquim  
Pires Calejo**

## **Sistema conversor de energia das ondas do mar**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Prof. Doutor Rui Pedro Ramos Cardoso, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.



Dedico este trabalho aos meus pais pelo amor, compreensão e empenho no acompanhamento da minha formação.

*“Posso ter defeitos, viver ansioso e ficar irritado algumas vezes,  
Mas não esqueço de que minha vida  
É a maior empresa do mundo...  
E que posso evitar que ela vá à falência.  
Ser feliz é reconhecer que vale a pena viver  
Apesar de todos os desafios, incompreensões e períodos de crise.  
Ser feliz é deixar de ser vítima dos problemas e  
Se tornar um autor da própria história...  
É atravessar desertos fora de si, mas ser capaz de encontrar  
Um oásis no recôndito da sua alma...  
É agradecer a Deus a cada manhã pelo milagre da vida.  
Ser feliz é não ter medo dos próprios sentimentos.  
É saber falar de si mesmo.  
É ter coragem para ouvir um “Não”!!!  
É ter segurança para receber uma crítica,  
Mesmo que injusta...”*

*Pedras no caminho?  
Guardo todas, um dia vou construir um castelo...”*

**(Fernando Pessoa)**



## **O Júri**

Presidente	<b>Prof. Doutor Alfredo Manuel Balacó de Moraes</b> Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro
Arguente	<b>Prof. Doutor José Luís Soares Esteves</b> Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Orientador	<b>Prof. Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo</b> Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro
Co-Orientador	<b>Prof. Doutor Rui Pedro Ramos Cardoso</b> Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro





## **Agradecimentos**

Aos meus pais pelo incansável acompanhamento dedicado ao longo do meu percurso pessoal e profissional.

Aos meus familiares e amigos que souberam estar próximos nos momentos difíceis e me reconfortaram.

A todos aqueles com os quais troquei experiências, ensinamentos, vivências, alegrias e tristezas.

À Eliana pela coragem, motivação e força que me transmitiu na realização deste trabalho.

Ao Prof. Doutor Francisco Queirós de Melo e ao Prof. Doutor Rui Cardoso, por todo o apoio e incentivos prestados.

A todos eles os meus profundos agradecimentos.



**Palavras-chave**

Energia das ondas; Sistemas de conversão de energia; Energias renováveis.

**Resumo**

O presente trabalho teve como objetivo fundamental desenvolver um mecanismo capaz de converter a energia das ondas do mar em energia elétrica utilizável pelas populações.

Numa primeira fase dos trabalhos foi realizado um estudo dos fenómenos físicos que estão na origem das ondas, o seu comportamento ao longo da sua propagação e as formas de interação das ondas com outros corpos.

Seguidamente foi feita uma análise aos sistemas de conversão de energia das ondas existentes, permitindo desta forma avaliar os pontos fortes destes sistemas e quais as suas limitações.

Por fim partiu-se para o projeto e modelação de um protótipo desenvolvido a pensar em maximizar a energia extraída das ondas.



**Keywords**

Wave energy; Energy conversion systems; Renewable energies.

**Abstract**

This study aimed to develop a fundamental mechanism to convert the energy of ocean waves into usable energy for the people.

In the first phase of work was a study of physical phenomena that are the source of the waves, their behaviour during their propagation and forms of interaction with other bodies.

Then an analysis was made to the systems available of wave energy conversion, thus allowing assess the strengths of these systems and their limitations.

Finally went to the design and modelling of a prototype to think about maximizing energy extracted from the waves.



## Índice

Lista de Figuras .....	II
Lista de Tabelas .....	III
Lista de Símbolos e Abreviações .....	IV
CAPÍTULO I .....	1
Introdução .....	1
1 Revisão histórica .....	3
1.1 Razões favoráveis ao aproveitamento da energia das ondas .....	5
1.2 Classificação dos mecanismos de extração de energia das ondas .....	5
1.2.1 Mecanismos de Coluna de Água Oscilante (CAO) .....	7
1.2.2 Atenuadores .....	8
1.2.3 Pontos de Absorção de Translação (OWSC) .....	10
1.2.4 Pontos de Absorção de Simetria Axial .....	11
1.2.5 Dispositivos de Diferença de Pressão .....	13
1.2.6 Dispositivos de Galgamento .....	15
CAPÍTULO II .....	17
2 Propriedades Físicas das Ondas Oceânicas .....	17
2.1 Teoria linear da onda <sup>[4;5;0.03]</sup> .....	19
2.2 Energia da onda <sup>[0.03]; [3]; [4]; [5]</sup> .....	22
CAPÍTULO III .....	26
3 Conversão da energia das ondas .....	26
CAPÍTULO IV .....	28
4 Projeto de um sistema de conversão de energia das ondas .....	28
4.1 Flutuador do tipo “Nodding Duck” .....	28
4.2 Dimensionamento e modelação do protótipo. ....	30
4.2.1 Flutuador. ....	30
4.2.2 Estrutura de suporte do flutuador. ....	32
4.2.3 Sistema de Ancoragem ao fundo marítimo .....	34
4.2.4 Caixa de velocidades .....	37
4.2.4.1 Anteprojeto .....	38
4.2.5 Transmissão de potência .....	41
4.2.6 Transformação de energia. ....	42
4.2.7 Estrutura superior. ....	43
CAPÍTULO V .....	46
5 Perspetivas futuras de exploração do recurso energético em Portugal .....	46
CAPÍTULO VI .....	49
6.1 Conclusões Gerais .....	49
6.2 Trabalhos Futuros .....	49
REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA .....	50
Apêndice I .....	A
Apêndice II .....	J

## Lista de Figuras

Figura 1: Modelo de circulação dos ventos provocados pelas diferenças de temperatura no planeta. <sup>[0.21]</sup>	1
Figura 2: Formação das ondas provocadas pelo vento. <sup>[0.06]</sup>	2
Figura 3: Distribuição mundial da potência das ondas em kW/m. <sup>[1]</sup>	3
Figura 4: "Wave Motor" Mecanismo patenteado em 1906 para gerar energia a partir das ondas <sup>[0.20]</sup>	3
Figura 5: Representação de alguns dos protótipos desenvolvidos e testados em alto mar <sup>[0.1]</sup>	4
Figura 6: Classificação dos mecanismos de extração de energia das ondas relativamente à sua localização geográfica <sup>[0.001]</sup>	5
Figura 7: Métodos convencionais utilizados para a captação da energia das ondas <sup>[0.1]</sup>	6
Figura 8: Central Europeia piloto de 400kW situada na ilha do Pico, em funcionamento desde 1999 <sup>[1]</sup>	7
Figura 9: Modelo esquemático de funcionamento da central europeia do Pico <sup>[1]</sup>	7
Figura 10: "OE-Buoy" é um dispositivo do tipo coluna de água oscilante desenvolvido para operar <i>nearshore</i> e testado em 2007 na Irlanda <sup>[0.2]</sup>	8
Figura 11: "Pelamis" protótipo de 750kW do tipo atenuador instalado ao largo da praia da Aguçadoura (Portugal) em 2008 <sup>[0.3]</sup>	8
Figura 12: Esquema de funcionamento do "Pelamis" <sup>[1]</sup>	9
Figura 13: "McCabe Wave Pump", protótipo com 40 m de comprimento localizado no estuário de Shannon (Irlanda) <sup>[0.01]</sup>	9
Figura 14: Modelo ilustrativo do funcionamento do "McCabe Wave Pump" <sup>[0.01]</sup>	9
Figura 15: "Oyster" É um mecanismo desenvolvido e testado na Escócia, projetado para fornecer uma potência máxima de 2MW <sup>[0.4]</sup>	10
Figura 16: "WaveRoller" Esquema de funcionamento <sup>[0.5]</sup>	10
Figura 17: Protótipo "WaveRoller" com 15 kW testado próximo da costa de Peniche <sup>[0.5]</sup>	11
Figura 18: "OPT Power Buoy" Protótipo de 40 kW testado em Santona (Espanha) <sup>[0.6]</sup>	11
Figura 19: Modelo esquemático do funcionamento do OPT Power Buoy <sup>[0.7]</sup>	12
Figura 20: "AquaBuoy", Protótipo de testes perto da costa de Oregon (EUA) <sup>[0.9]</sup>	12
Figura 21: "AquaBuoy", Esquema de funcionamento <sup>[0.8]</sup>	13
Figura 22: Elemento de um dispositivo "Ceto" <sup>[10]</sup>	13
Figura 23: Ilustração princípio de funcionamento da tecnologia "Ceto" <sup>[10]</sup>	14
Figura 24: Protótipo do "Archimedes Wave Swing" de 2MW testado ao largo da costa portuguesa em Outubro de 2004 <sup>[0.02]</sup>	14
Figura 25: "Archimedes Wave Swing", modelo ilustrativo de funcionamento (esquerda); Ilustração de um parque de energia das ondas utilizando a tecnologia "Archimedes Wave Swing" (direita) <sup>[0.11]</sup>	14
Figura 26: Dispositivo desativado do tipo "Tapchan" situado na Noruega <sup>[0.12]</sup>	15
Figura 27: Esquema de funcionamento de um dispositivo do tipo "Tapchan" <sup>[0.13]</sup>	15
Figura 28: Dispositivo "Wave Dragon" <sup>[0.14]</sup>	16
Figura 29: Esquema de funcionamento de um dispositivo do tipo "Wave Dragon" <sup>[0.14]</sup>	16
Figura 30: Bóia de monitorização <sup>[0.15]</sup>	17
Figura 31: Distribuição das boias de monitorização das ondas em Portugal <sup>[0.16]</sup>	17
Figura 32: Altura máxima e significativa das ondas registadas entre Setembro de 2010 e Setembro de 2011 pelo ondógrafo localizado em Leixões <sup>[0.16]</sup>	18
Figura 33: Período máximo e significativo das ondas registadas entre Setembro de 2010 e Setembro de 2011 pelo ondógrafo localizado em Leixões <sup>[0.16]</sup>	18
Figura 34: Espectro de níveis de energia relativa para ondas com diferentes origens <sup>[3]</sup>	19
Figura 35: Definição dos parâmetros da onda a duas dimensões segundo a teoria linear.	20
Figura 36: Perfil das ondas em função da profundidade do mar: (a) Águas profundas, $h > \lambda/2$ ; (b) Águas de profundidade intermédia, $\lambda/2 > h > \lambda/20$ ; (c) Águas superficiais, $h < \lambda/20$ <sup>[0.01]; [3]</sup>	21
Figura 37: Energia da cinética e potencial da onda <sup>[0.06]</sup>	22
Figura 38: Perfil de uma onda a duas dimensões segundo a teoria linear <sup>[5]</sup>	23
Figura 39: Gráfico do comportamento instantâneo da onda e energia potencial associada, segundo a teoria linear considerando uma onda com amplitude de 2 metros e um período de 7 segundos.	23
Figura 40: Gráfico da distribuição da energia cinética acumulada em função da profundidade para uma onda com uma altura de 2m e um período de 7 segundos.	24
Figura 41: Representação do efeito da sobreposição das ondas incidentes com as ondas geradas pelo flutuador <sup>[3]</sup>	26



Figura 42: Exemplo do funcionamento de três tipos de mecanismos de reação. 1-Mecanismo de reação com referência fixa; 2- Mecanismo de reação com plataforma móvel; 3 Mecanismo de reação inercial <sup>[0.03]</sup> .....	27
Figura 43: Vista de perfil de um flutuador do tipo “ <i>Nodding Duck</i> ” <sup>[3]</sup> .....	28
Figura 44: Características geométricas do flutuador “ <i>Nodding Duck</i> ” <sup>[3]</sup> .....	30
Figura 45: Modelo de um flutuador do tipo “ <i>Nodding Duck</i> ” com 20 m de comprimento. ....	32
Figura 46: Estrutura de suporte do flutuador. ....	33
Figura 47: Princípio de funcionamento do mecanismo. ....	33
Figura 48: Efeito pêndulo da estrutura de suporte. ....	34
Figura 49: Eficiência do flutuador “ <i>Nodding Duck</i> ” em função da frequência adimensional, considerando diferentes ângulos de incidência da onda. Resultados obtidos por Mr.Carmichael (1978). <sup>[0.08]</sup> .....	34
Figura 50: Eficiência do flutuador “ <i>Nodding Duck</i> ” em função da frequência adimensional considerando diferentes tipos de ancoragem: a) amarração folgada; b) amarração firme por corrente; c) amarração simples; d) amarração firme por quatro correntes; e) amarração por estrutura rígida <sup>[3]</sup> .....	35
Figura 51: Corrente metálica (esquerda); Corda de nylon (direita). ....	36
Figura 52: Âncora do tipo Danforth. ....	36
Figura 53: Principais componentes do sistema de ancoragem.....	37
Figura 54: Modelo representativo da estrutura de suporte do flutuador ancorada. ....	37
Figura 55: Princípio de funcionamento da caixa de velocidades.....	38
Figura 56: Modelo representativo do funcionamento das engrenagens da caixa de velocidades. ....	39
Figura 57: Detalhe do sistema planetário ..... 40	40
Figura 58: Perspetiva explodida de todos os componentes da caixa de velocidades. ....	40
Figura 59: Desenho de conjunto da caixa de velocidades. ....	40
Figura 60: Fotorrealismo da caixa de velocidades com os apoios de fixação à estrutura de suporte. ....	41
Figura 61: Corrente de rolos simples desenvolvida para resistir a ambientes corrosivos (esquerda). Comparação entre o nível de corrosão de uma corrente desenvolvida com a tecnologia Hidro-Service, com uma corrente de aço-carbono ou de niquelagem convencional, após 14 dias em contacto não permanente com água salgada (direita). <sup>[0.17]</sup> .....	41
Figura 62: Ligação entre o flutuador e a caixa de velocidades.....	42
Figura 63: Sistema de conversão de energia mecânica em energia elétrica. ....	42
Figura 64: “Redes Inteligentes”- Visão e estratégia para as redes elétricas futuras <sup>[0.22]</sup> .....	43
Figura 65: Vista estrutura de suporte dos mecanismos de conversão de energia. ....	43
Figura 66: Vista das portas de acesso ao interior do mecanismo e das luzes de sinalização. ....	44
Figura 67: Desenho de conjunto do conversor de energia das ondas. ....	44
Figura 68: Modelo representativo do protótipo em ambiente marítimo. ....	45
Figura 69: Fotorrealismo do protótipo em funcionamento. ....	45
Figura 70: Zonas de acesso restrito (esquerda); Zonas de possíveis áreas de concessão (direita) <sup>[0.07]</sup> .....	46
Figura 71: Mapa da rede elétrica Nacional (em cima); Mapa da densidade populacional portuguesa no ano 2001 (em baixo) <sup>[0.07]</sup> <sup>[0.23]</sup> .....	47

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Características físicas das ondas em função da profundidade do mar <sup>[3]</sup> .....	22
Tabela 2: Variáveis energéticas das ondas e potência disponível ao flutuador considerando diferentes alturas e períodos de onda. ....	29
Tabela 3: Características físicas das ondas num possível local a instalar o protótipo de testes.....	30
Tabela 4: Dimensões geométricas propostas para o flutuador de testes. ....	32

## Lista de Símbolos e Abreviações

kW -	Unidade de potência do sistema internacional de unidades equivalente a $10 \times 10^3$ Watt.
MW -	Unidade de potência do sistema internacional de unidades equivalente a $10 \times 10^6$ Watt.
GW -	Unidade de potência do sistema internacional de unidades equivalente a $10 \times 10^9$ Watt.
TW -	Unidade de potência do sistema internacional de unidades equivalente a $10 \times 10^{12}$ Watt.
m -	Metro linear.
mm -	Milímetro.
$m^2$ -	Metro quadrado.
$m^3$ -	Metro cúbico.
$\lambda$ -	Comprimento de onda.
H -	Altura da onda.
a -	Amplitude da onda.
c -	Velocidade de propagação da onda.
cg -	Grupo de velocidade de propagação da onda.
u -	Velocidade horizontal de propagação das partículas da onda.
v -	Velocidade vertical de propagação das partículas da onda.
g -	Aceleração da gravidade ao nível médio do mar.
h -	Profundidade do mar.
z -	Posição vertical de uma partícula de onda relativamente ao nível médio da água.
T -	Período de oscilação.
$\omega$ -	Frequência angular de excitação.
k -	Número de onda.
H -	Superfície de água deslocada relativamente ao nível médio.
x -	Posição de referência horizontal.
t -	Tempo.
e -	Número de Neper.
$\eta$ -	Perfil da superfície da água segundo a teoria linear.
$\pi$ -	Número PI.
cos -	Designação matemática de coseno.
sin -	Designação matemática de seno.
cosh -	Designação matemática de coseno hiperbólico.
sinh -	Designação matemática de seno hiperbólico.
tanh -	Designação matemática de tangente hiperbólica.
$\Delta m$ -	Designação de elemento de massa.
$\Delta x$ -	Designação de elemento de comprimento na direção x (horizontal).
$\Delta z$ -	Designação de elemento de comprimento na direção z (vertical).
$E_p$ -	Energia potencial.
$E_c$ -	Energia cinética.
J -	Unidade de energia do sistema internacional de unidades – Joule.
kJ -	Unidade de energia equivalente a $10 \times 10^3$ Joule.
$\int$ -	Símbolo matemático de integral.
$\partial$ -	Símbolo matemático de derivada.
P -	Potência
R2 -	Dimensão característica do flutuador “Nodding Duck”.
s -	Unidade de tempo – segundo.
Hz -	Frequência de oscilação - Hertz.
B -	Comprimento do flutuador.
M -	Massa do flutuador.
$L_d$ -	Dimensão característica do flutuador.
$R_D$ -	Dimensão característica do flutuador.
$R_o^1$ -	Dimensão característica do flutuador.

$r_D$ -	Dimensão característica do flutuador.
$\Lambda$ -	Ângulo de localização do centro de massa do flutuador.
$T_D$ -	Período de oscilação do flutuador.
$f_D$	Frequência natural de oscilação do flutuador.
rpm -	Sigla de número de rotações por minuto.

## CAPÍTULO I

Na primeira parte deste capítulo, é feita uma breve descrição dos fenômenos físicos que estão na origem das ondas, a forma como a energia das ondas se encontra distribuída globalmente e as principais vantagens do aproveitamento deste recurso energético. Numa segunda parte, a revisão histórica, mostra como se deu a evolução dos mecanismos de aproveitamento de energia das ondas desde os primórdios até à atualidade. A terceira parte é dedicada à classificação dos mecanismos de extração de energia das ondas. Aqui são apresentados alguns exemplos de protótipos testados no mar, os quais são representativos do atual estado da arte.

### Introdução

As ondas do mar são originadas pela interação da água com o vento, corpos em movimento, distúrbios sísmicos ou campos gravíticos de outros planetas e são simplesmente uma forma de energia acumulada e em transição.

A principal fonte energética primária de formação das ondas a nível planetário é o sol.

A radiação solar é coletada pelas massas de água e terra do nosso planeta, criando-se um diferencial de temperatura entre as camadas de ar próximas da superfície e as camadas de ar mais afastadas. O ar quente de menor densidade eleva-se dando lugar ao ar mais frio das camadas atmosféricas superiores, gerando correntes térmicas verticais. Paralelamente a estas correntes o ar quente das zonas equatoriais desloca-se para as zonas polares enquanto o ar frio polar se desloca para regiões mais quentes do globo, resultando no padrão meteorológico global da circulação dos ventos.

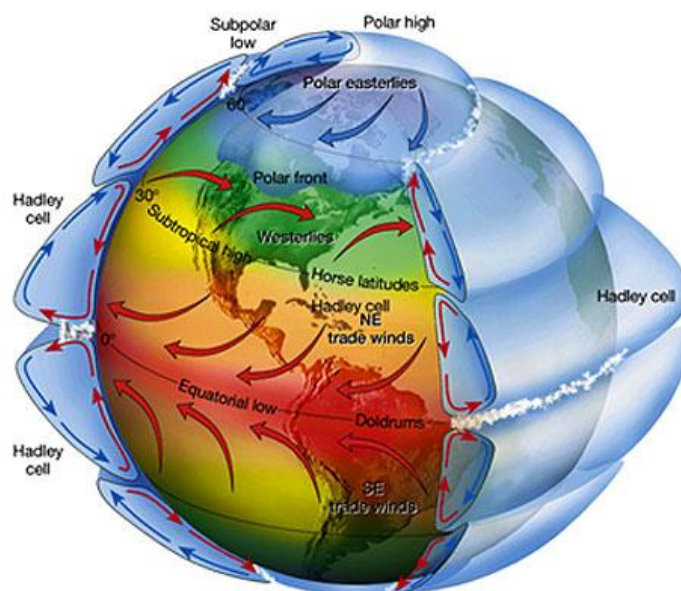


Figura 1: Modelo de circulação dos ventos provocados pelas diferenças de temperatura no planeta. <sup>[0.21]</sup>

Parte da energia cinética dos ventos formados é posteriormente transferida para a água devido ao atrito entre as duas superfícies, gerando-se desta forma as ondas.

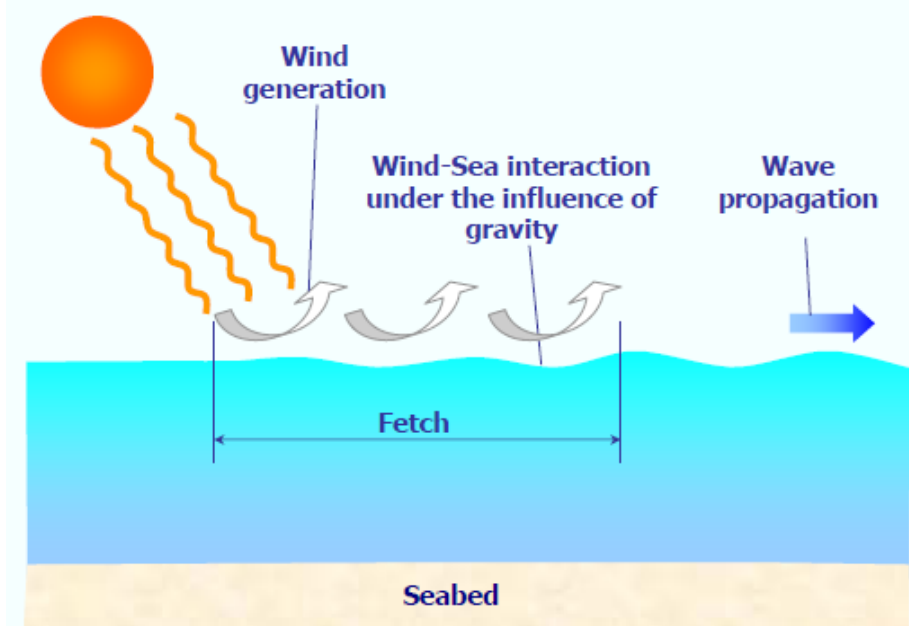


Figura 2: Formação das ondas provocadas pelo vento. <sup>[0.06]</sup>

Um dos aspetos mais interessantes da transformação de energia solar em energia das ondas é que a potência por unidade de área normal à direção de transmissão de energia aumenta consideravelmente. Por exemplo a densidade energética solar a 15° de latitude é de 0,17 kW/m<sup>2</sup>, a velocidade dos ventos nesta latitude a meio do Pacífico ronda os 10m/s, correspondendo a uma densidade de energia eólica de 0,580 kW/m<sup>2</sup>. A densidade energética das ondas geradas por estes ventos tem uma intensidade de 8,42 kW/m<sup>2</sup>. <sup>[3]</sup>

Uma vez formadas, as ondas podem percorrer milhares de quilómetros com poucas perdas energéticas, a menos que encontrem ventos em sentido contrário ou outras formas de atrito como o causado pela interação com o fundo marítimo.

A energia das ondas é proporcional ao quadrado da amplitude da onda e ao período da sua oscilação. Ondas com período de 7 a 10 segundos e amplitude próxima dos 2m, têm fluxos de energia que normalmente excedem os 40 kW por metro de largura de onda. <sup>[2]</sup>

Estima-se (Cruz 2008) que em termos médios anuais, o fluxo de energia das ondas ao longo da costa mundial roda os 2 TW, valor da mesma ordem de grandeza da potência elétrica média consumida mundialmente. <sup>[1]</sup>

O recurso energético das ondas encontra-se exemplificado na Figura 3 onde o potencial de cada zona é representado em kW por metro de frente de onda. Estes valores representam o fluxo médio anual de energia que atravessa cada metro de frente de onda e são variáveis, podendo atingir, em estados de tempestade 1 MW/m. O recurso energético das ondas na Europa representa cerca de 16% do recurso mundial, contabilizando 320 GW <sup>[2]</sup>. Em Portugal estão "disponíveis" 21 GW, distribuídos 15 GW pelo Continente e 6 GW pelas Regiões Autónomas.

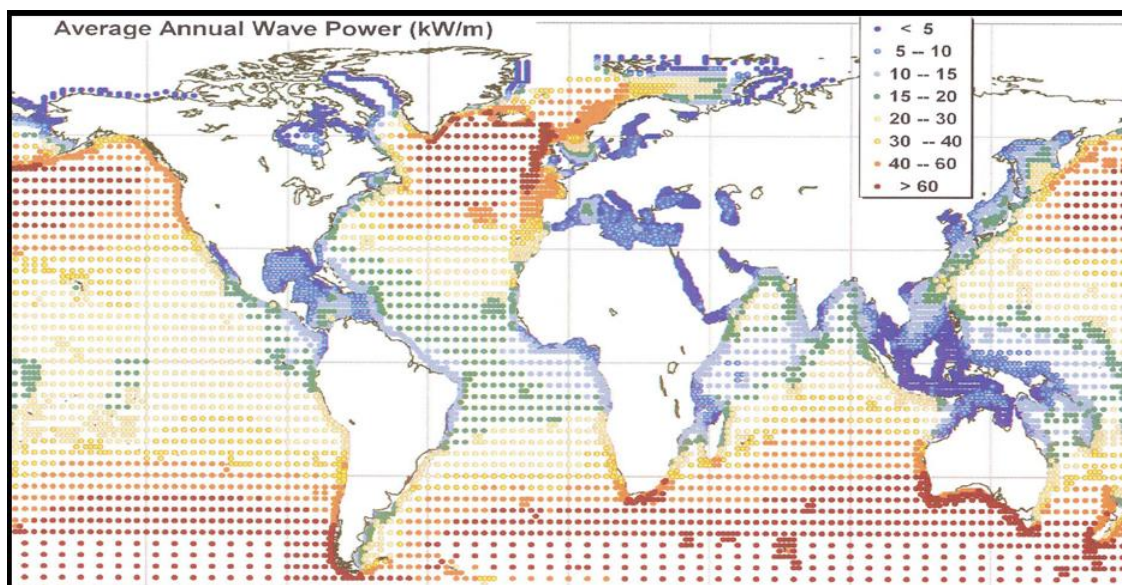


Figura 3: Distribuição mundial da potência das ondas em kW/m. <sup>[1]</sup>

Mesmo sendo extremamente conservadoras as taxas de conversão de energia, entre 10 a 25% da total disponível, podemos facilmente perceber no caso concreto de Portugal, qual a sua importância para a independência energética e desenvolvimento do país <sup>[1]</sup>.

## 1 Revisão histórica

A ideia de converter a energia das ondas em formas de energia utilizáveis não é nova. A primeira patente para a extração da energia das ondas foi atribuída em 1799 a Girard & Sons, França, cujo mecanismo consistia num sistema do tipo corpo flutuante em que a sua oscilação era aproveitada para movimentar moinhos, bombas, serras e outra maquinaria pesada.

Entre 1855 e 1973 foram atribuídas 340 novas patentes a configurações de conversores de energia das ondas, alguns dos quais foram inclusivamente construídos e testados.

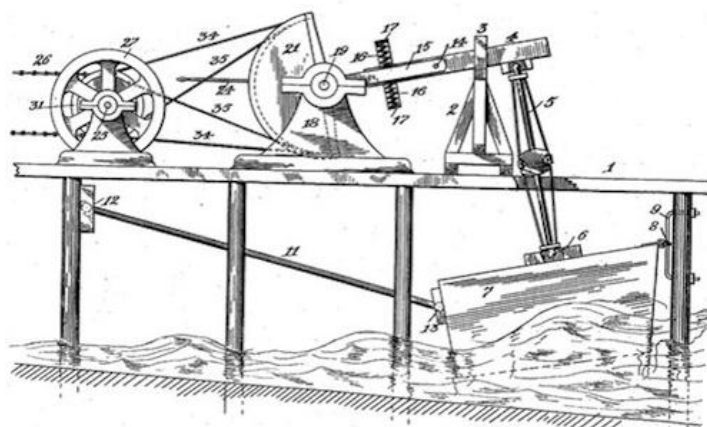


Figura 4: "Wave Motor" Mecanismo patenteado em 1906 para gerar energia a partir das ondas <sup>[0.20]</sup>.

A crise petrolífera de 1973 levou ao desenvolvimento de um trabalho intensivo de investigação e desenvolvimento de novos modelos, verificando-se um especial empenho



governamental e privado de países como Portugal, Reino Unido, Japão, Austrália, Dinamarca, Noruega, Suécia, Estados Unidos da América, Índia e México. Esse esforço iniciou-se com investigação de natureza fundamental (teórica e experimental) e prosseguiu com investigação cada vez mais aplicada, até aos dias de hoje, em que se assiste ao teste dos primeiros protótipos em alto mar.



Figura 5: Representação de alguns dos protótipos desenvolvidos e testados em alto mar <sup>[0.1]</sup>.

Paralelamente, os principais intervenientes nesta área deixaram de ser apenas cientistas e universitários, para passarem a incluir técnicos e engenheiros integrados em empresas envolvidas no desenvolvimento dos referidos protótipos. Os técnicos e engenheiros passaram a prestar serviços relacionados com a construção, instalação e teste no mar desses protótipos, bem como em preparar o caminho para o desenvolvimento industrial desta tecnologia <sup>[0.05]</sup>.

Em 2004 é inaugurado na Escócia o Centro Europeu de Energia Marítima, entidade que tem levado a cabo o trabalho de desenvolvimento e teste de protótipos, bem como das infraestruturas necessárias ao seu funcionamento.

Em Setembro de 2008 é inaugurado em Portugal o primeiro parque mundial de aproveitamento de energia das ondas utilizando a tecnologia “Pelamis”, com uma potência instalada de 2.25 MW, e em Outubro do mesmo ano é inaugurado em Espanha o lançamento da primeira boia de 40 kW de um parque com uma capacidade prevista de 1,39MW <sup>[18]</sup>.

Em Outubro de 2011 o governo português aprova a instalação ao largo da costa de Peniche da primeira unidade de um mecanismo do tipo “WaveRoller” de 300kW, estando prevista a criação de um novo parque de energia com uma potência instalada entre os 50 e os 100 MW <sup>[0.19]</sup>.

## 1.1 Razões favoráveis ao aproveitamento da energia das ondas.

Existem várias razões que levam muitos autores a considerar que o aproveitamento da energia contida nas ondas poderá sofrer um desenvolvimento em massa como o que atualmente se verifica na instalação de aerogeradores para aproveitamento da energia eólica. Entre as principais razões apontadas podemos destacar as seguintes:

- Cerca de 71% da superfície terrestre está coberta de água, que funciona como um enorme coletor solar e armazena energia sob a forma de ondas;
- O recurso disponível por unidade de área das é aproximadamente 50 vezes superior à energia solar e cerca de 15 vezes superior à energia eólica <sup>[3]</sup>;
- É uma fonte de energia limpa e inesgotável;
- Está disponível 24h por dia e é mais previsível que a energia solar e a energia eólica, o que reduz os tempos de amortização dos investimentos e poderá atrair maior número de investidores para os projetos;
- Não requer grandes infraestruturas em terra, como estradas e terrenos de instalação, comparativamente com o caso das instalações de energia eólica e solar convencionais;
- O impacto visual e ambiental dos dispositivos de aproveitamento de energia das ondas é reduzido, e podendo ser integrados com outras estruturas passivas, como por exemplo em quebra mares;

## 1.2 Classificação dos mecanismos de extração de energia das ondas

A extração da energia armazenada nas ondas assenta num princípio fundamental que é o de promover o movimento linear ou de rotação de um mecanismo acoplado a um gerador que converte a energia mecânica em energia elétrica.

Os sistemas de conversão de energia das ondas, vulgarmente designados por OWEC's (Ocean Wave Energy Converters), podem ser classificados quanto à sua distância à costa em mecanismos *Shoreline*, *Nearshore* ou *Offshore*.



Figura 6: Classificação dos mecanismos de extração de energia das ondas relativamente à sua localização geográfica <sup>[0.001]</sup>.



Os mecanismos *Shoreline* são caracterizados por todos os sistemas construídos para operar na costa. Apresentam como principal vantagem a facilidade de ancoragem e de acesso para a realização de operações de manutenção. Os custos da instalação são normalmente inferiores ao dos restantes mecanismos, e as perdas no transporte de eletricidade são baixas dada a proximidade com a rede elétrica. Por outro lado para além do elevado impacto visual que poderão causar, a energia que conseguem aproveitar é muito inferior à energia transportada pela onda antes de ocorrer a dissipação energética resultante do atrito com o solo marítimo junto à costa.

Nos mecanismos do grupo *Nearshore* incluem-se os sistemas mecânicos instalados até uma profundidade de aproximadamente 20 m. Estes tipo de dispositivos, para além de operarem numa área com maior densidade energética que os dispositivos *shoreline* e dos menores impactos visuais causados, apresentam usualmente como contrapartida um investimento inicial mais elevado. Além disso podem representar uma barreira para a navegabilidade marítima junto à costa.

Os mecanismos *Offshore* caracterizam-se por operarem em águas profundas, situados entre os 40m a 60m de profundidade, e onde os regimes de energia das ondas são mais elevados. Em contrapartida os principais pontos fracos que apresentam são os elevados custos de construção, as dificuldades de instalação e manutenção, e as elevadas perdas elétricas de transporte devido à distância até à rede de distribuição.

Para além da classificação anterior, podemos agrupar os dispositivos mecânicos de extração de energia das ondas relativamente ao seu regime de funcionamento. Assim podemos ter mecanismos de Coluna de Água Oscilante, Atenuadores, Pontos de Absorção de Simetria Axial, Pontos de Absorção de Translação, Dispositivos de Diferença de Pressão e Dispositivos de Galgamento.

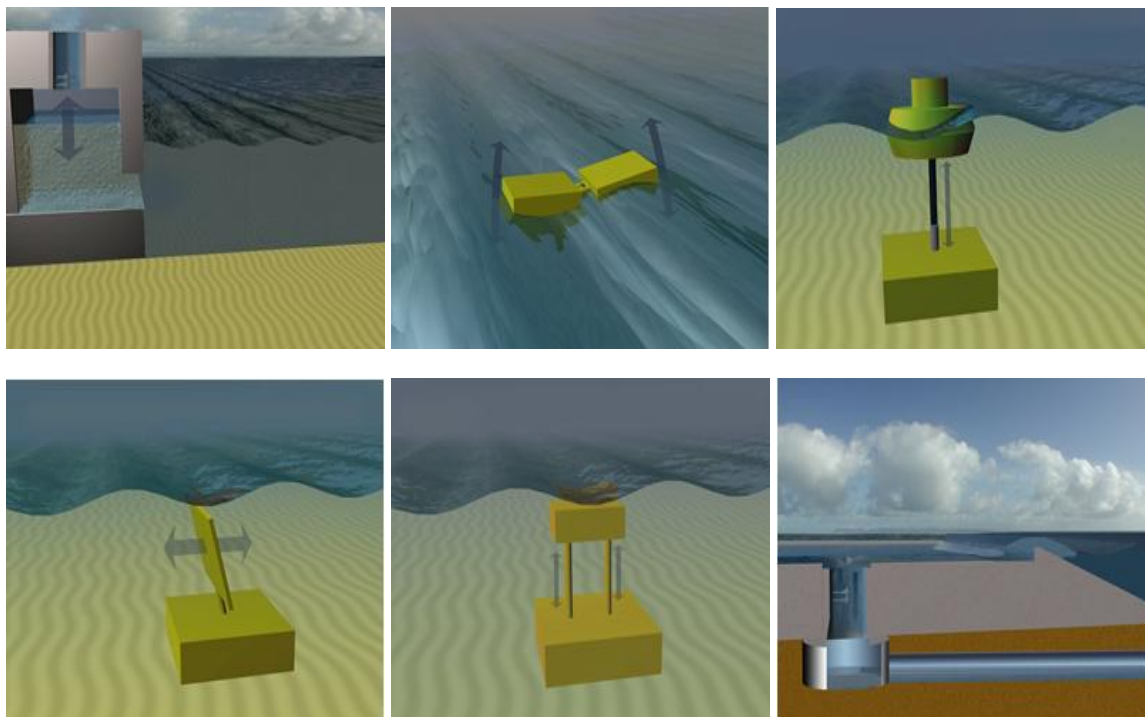


Figura 7: Métodos convencionais utilizados para a captação da energia das ondas <sup>[0.1]</sup>.

### 1.2.1 Mecanismos de Coluna de Água Oscilante (CAO)

Os CAO são constituídos por uma estrutura oca parcialmente submersa e com abertura para o mar. O ar contido no interior da câmara é comprimido e descomprimido pela oscilação da coluna de água em contacto com as ondas marítimas. Na parte superior da estrutura destes mecanismos encontra-se instalada uma turbina do tipo “Wells” de duplo sentido, cujo acionamento é conseguido pelos fluxos de ar gerados.

Quando concebidos corretamente para o estado de mar dominante, os CAO podem ser sintonizados com o período de onda incidente para causar ressonância.

Estes tipos de mecanismos têm sido testados um pouco por todo o mundo, nomeadamente em países como a Índia, China, Noruega, Japão, Portugal e Reino Unido.



Figura 8: Central Europeia piloto de 400kW situada na ilha do Pico, em funcionamento desde 1999 <sup>[1]</sup>.

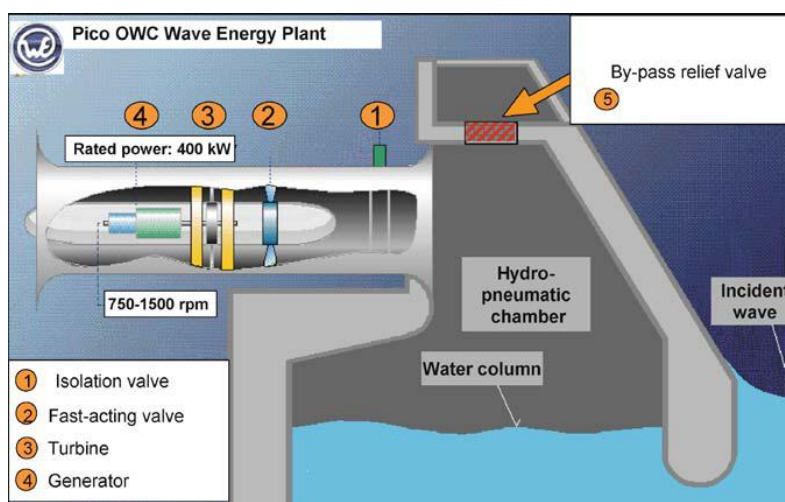


Figura 9: Modelo esquemático de funcionamento da central europeia do Pico <sup>[1]</sup>.

Após os primeiros testes dos dispositivos CAO em *shoreline*, novos mecanismos foram desenvolvidos utilizando o mesmo princípio de funcionamento, mas desta vez adaptados para operarem em *nearshore* e em *offshore*.



Figura 10: "OE-Buoy" é um dispositivo do tipo coluna de água oscilante desenvolvido para operar *nearshore* e testado em 2007 na Irlanda <sup>[0.2]</sup>.

### 1.2.2 Atenuadores

Este grupo de mecanismos habitualmente constituídos por múltiplas estruturas flutuantes, caracterizam-se pela sua orientação paralela à direção da onda. A propagação das ondas ao longo do comprimento dos módulos faz com que estes adotem orientações distintas. Sistemas hidráulicos localizados nas ligações articuladas permitem absorver a energia mecânica resultante do movimento dos módulos, convertendo-a em energia sob a forma de pressão hidráulica. São enquadrados neste grupo os dispositivos *Pelamis* e *McCabe Wave Pump*.

Os dispositivos *Pelamis* são uma estrutura composta por secções cilíndricas parcialmente submersas que se ligam através de juntas articuladas e estão ancorados ao fundo marítimo por meio de cabos. As ondas induzem o movimento desfasado dos diferentes módulos, fazendo com que por meio de cilindros hidráulicos localizados nas zonas de união, seja bombeado óleo a alta pressão para motores hidráulicos. A eletricidade é produzida por meio de geradores elétricos acoplados aos referidos motores e igualmente localizados no interior das secções.



Figura 11: "Pelamis" protótipo de 750kW do tipo atenuador instalado ao largo da praia da Aguçadoura (Portugal) em 2008 <sup>[0.3]</sup>.

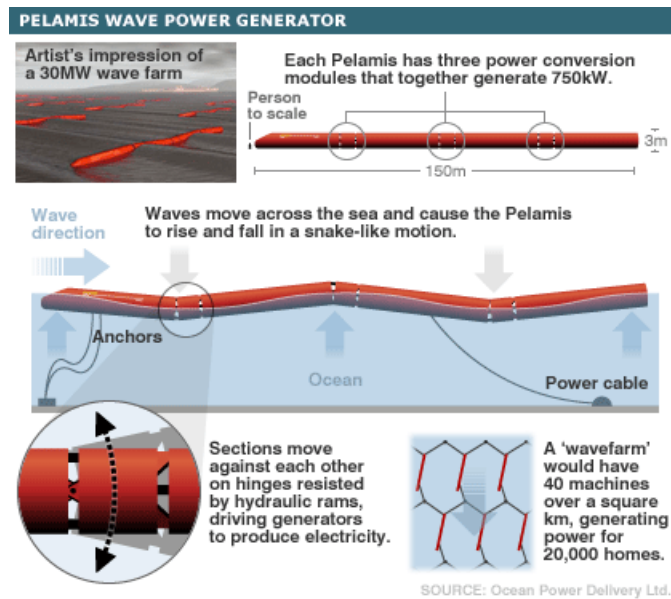


Figura 12: Esquema de funcionamento do "Pelamis" <sup>[1]</sup>.

Os dispositivos *McCabe Wave Pump* são mecanismos compostos por três plataformas ligadas linearmente por articulações e ancorados ao fundo marítimo através de uma estrutura metálica acoplada ao módulo central. As duas plataformas das extremidades atuam sobre bombas hidráulicas localizadas nas zonas de união com o módulo central, pressurizando um fluido. Apesar de inicialmente serem concebidos para bombeamento de água em processos de dessalinização, podem igualmente ser usados para a geração de eletricidade.



Figura 13: "*McCabe Wave Pump*", protótipo com 40 m de comprimento localizado no estuário de Shannon (Irlanda) <sup>[0.01]</sup>.

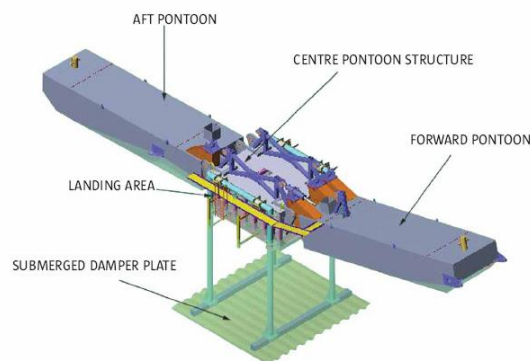


Figura 14: Modelo ilustrativo do funcionamento do "*McCabe Wave Pump*" <sup>[0.01]</sup>.



### 1.2.3 Pontos de Absorção de Translação (OWSC)

Os pontos de absorção de translação foram concebidos para operar em águas pouco profundas onde a velocidade da onda é predominantemente horizontal. Consistem de um modo geral numa plataforma orientada perpendicularmente com a direção de propagação da onda e acoplada por meio de uma articulação a uma plataforma fixa ao fundo do mar. As partículas de água em translação atuam sobre a plataforma oscilante acionando-a. Um sistema hidráulico existente entre as duas plataformas comprime um fluido no seu interior, cuja energia sob a forma de pressão é posteriormente convertida em energia elétrica. Os mecanismos mais conhecidos que usam este princípio são o *Oyster* e o *WaveRoller*.

O dispositivo *Oyster* é um mecanismo constituído por duas plataformas, uma fixa e outra oscilante. A plataforma oscilante atua sobre um cilindro hidráulico que comprime um fluido no interior de uma tubagem. Na orla marítima encontra-se uma turbina hidroelétrica que é acionada pelo fluido comprimido a alta pressão.

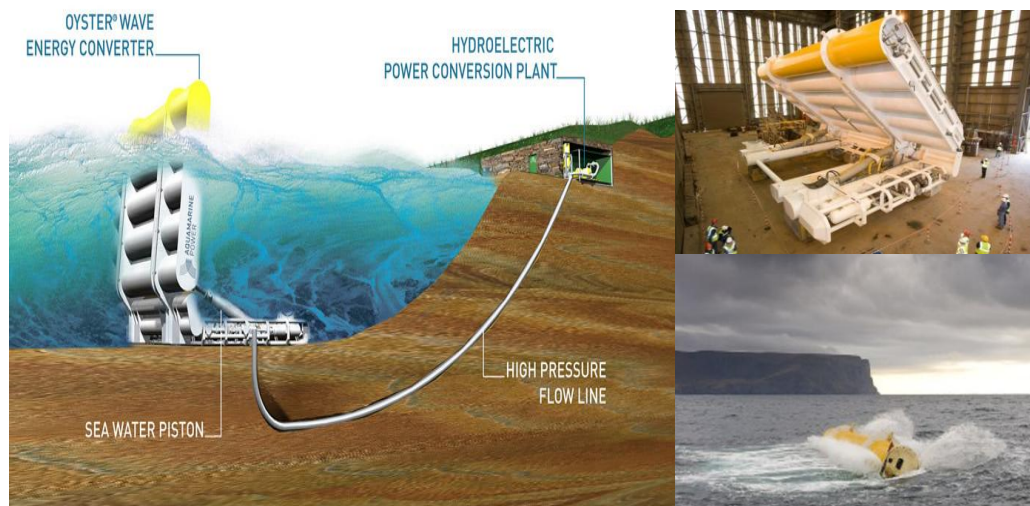


Figura 15: "*Oyster*" É um mecanismo desenvolvido e testado na Escócia, projetado para fornecer uma potência máxima de 2MW <sup>[0.4]</sup>.

A tecnologia *Waveroller* foi desenvolvida para aproveitar o efeito do aumento da velocidade horizontal das partículas da onda à medida que a profundidade diminui. O sistema de conversão de energia assim como o modo de funcionamento é idêntico ao do mecanismo *Oyster*.

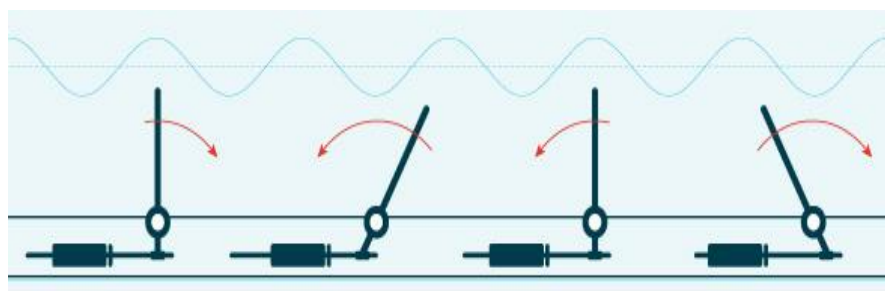


Figura 16: "*WaveRoller*" Esquema de funcionamento <sup>[0.5]</sup>.

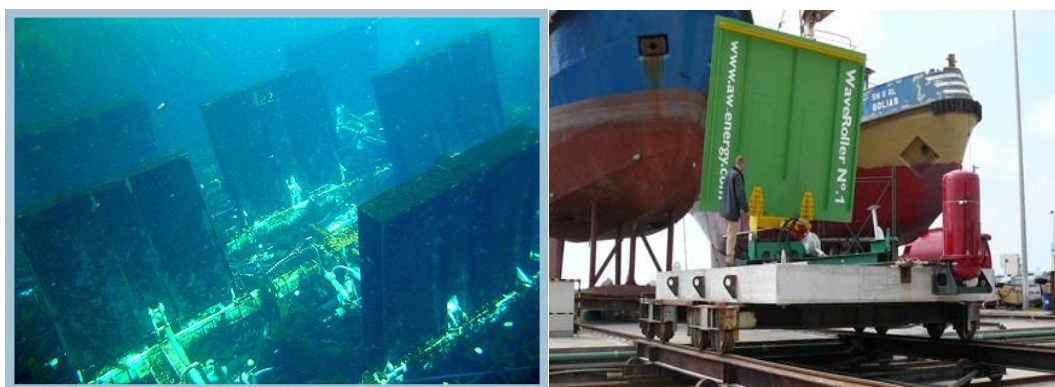


Figura 17: Protótipo "WaveRoller" com 15 kW testado próximo da costa de Peniche <sup>[0.5]</sup>.

#### 1.2.4 Pontos de Absorção de Simetria Axial

Estes mecanismos são caracterizados por terem uma dimensão pequena relativamente ao comprimento das ondas que os movimentam. Podem em geral absorver a energia das ondas segundo várias direções independentemente da sua orientação inicial. Fazem parte deste grupo os mecanismos do tipo boia *OPT Power Buoy* e o dispositivo *AquaBuoy*.

O dispositivo *OPT Power Buoy* consiste num sistema cujo movimento relativo entre a boia e a plataforma de sustentação é aproveitado para compressão de óleo dentro de um cilindro hidráulico. Um motor hidráulico ligado a um gerador converte a energia do fluido pressurizado em eletricidade.



Figura 18: "*OPT Power Buoy*" Protótipo de 40 kW testado em Santona (Espanha) <sup>[0.6]</sup>.

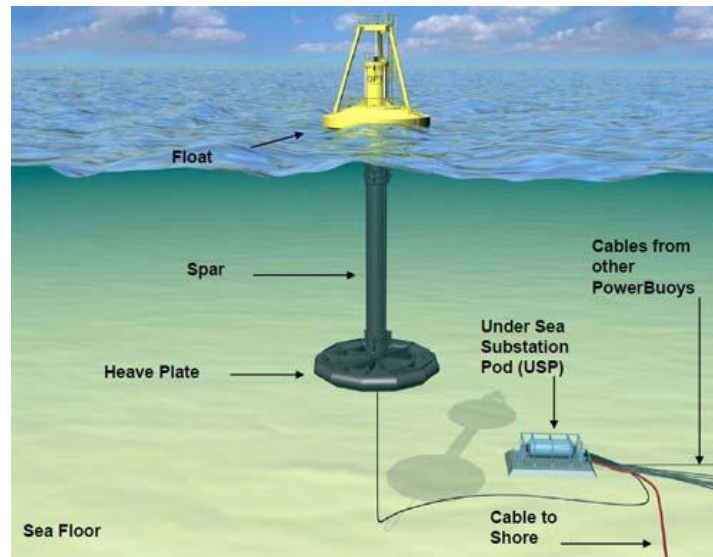


Figura 19: Modelo esquemático do funcionamento do *OPT Power Buoy* <sup>[0.7]</sup>.

O mecanismo *AquaBuoy* é um dispositivo constituído por um tubo cilíndrico reto aberto em ambas as extremidades permitindo a entrada e saída de água. Superiormente está ligado a um flutuador que o sustenta próximo da superfície. No interior do tubo existe um disco largo de flutuação neutra, o pistão. Uma mangueira de borracha com reforço de aço liga o pistão ao flutuador. O movimento relativo destas partes provoca uma variação do volume interno da mangueira, pressurizando a água contida no seu interior. Um acumulador de alta pressão localizado no flutuador alimenta uma turbina hidráulica que por sua vez aciona um gerador elétrico para a produção de eletricidade.



Figura 20: "*AquaBuoy*", Protótipo de testes perto da costa de Oregon (EUA) <sup>[0.9]</sup>.

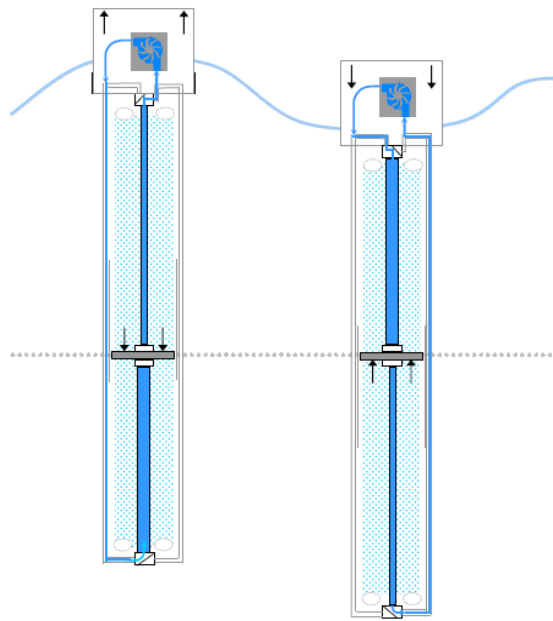


Figura 21: "AquaBuoy", Esquema de funcionamento <sup>[0.8]</sup>.

### 1.2.5 Dispositivos de Diferença de Pressão

Os dispositivos de diferença de pressão são mecanismos submersos apoiados no fundo do mar e habitualmente localizados perto da costa. O movimento das ondas provoca uma variação da pressão sobre os dispositivos fazendo com que estes se desloquem verticalmente. Os dispositivos mais conhecidos desta categoria são os mecanismos *Ceto* e *Archimedes Wave Swing*.

Os dispositivos *Ceto* consistem num conjunto de boias submersas ligadas a unidades de compressão de água. As diferenças de pressão acima dos flutuadores, bem como as correntes marítimas fazem com que as boias oscilem e acionem um sistema de bombeamento de água. A água sob pressão é então canalizada para uma turbina hidroelétrica localizada na zona costeira onde é gerada a eletricidade.

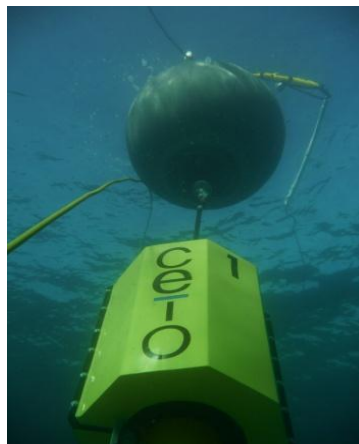


Figura 22: Elemento de um dispositivo "Ceto" <sup>[10]</sup>.





Figura 23: Ilustração princípio de funcionamento da tecnologia "Ceto" <sup>[10]</sup>.

O mecanismo *Archimedes Wave Swing* é constituído por duas câmaras cilíndricas, uma inferior ancorada ao fundo marítimo e aberta no topo e outra flutuante que envolve a primeira. Entre as duas câmaras encontra-se enclausurado uma quantidade de ar que é impedida de sair devido ao equilíbrio de pressões geradas. Durante a crista da onda, o aumento de pressão faz descer a câmara superior, comprimindo o ar. Após a passagem da crista da onda a câmara superior sobe devido à pressão de ar no seu interior ser superior à pressão no exterior.

A conversão em energia elétrica é conseguida por meio de um gerador linear de íman permanente localizado entre as duas plataformas.



Figura 24: Protótipo do "Archimedes Wave Swing" de 2MW testado ao largo da costa portuguesa em Outubro de 2004 <sup>[0.02]</sup>.

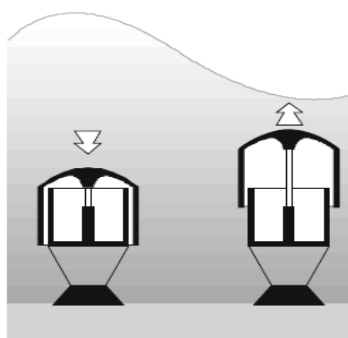


Figura 25: "Archimedes Wave Swing", modelo ilustrativo de funcionamento (esquerda); Ilustração de um parque de energia das ondas utilizando a tecnologia "Archimedes Wave Swing" (direita) <sup>[0.11]</sup>.

### 1.2.6 Dispositivos de Galgamento

Os dispositivos de galgamento são constituídos por um sistema que permite a elevação das ondas e por um reservatório que armazena a água acima do nível médio oceânico. Na zona inferior do reservatório encontram-se turbinas de baixa queda através das quais a água é devolvida ao oceano por um processo idêntico ao das convencionais barragens hidroelétricas. Os exemplos mais representativos destes mecanismos são os dispositivos *Tapchan* e *Wave Dragon*.

O mecanismo *Tapchan* é um sistema composto por um canal orientado segundo a direção de propagação das ondas e por um reservatório de armazenamento de água. As ondas incidentes são conduzidas ao longo do canal que vai gradativamente diminuindo de largura e de profundidade, e abastece com água um reservatório situado num nível superior ao do mar. Posteriormente a água é canalizada para uma turbina, situada numa cota inferior ao reservatório, cujo acionamento é conseguido pela transformação da energia potencial da água em energia cinética. Um gerador elétrico acoplado à turbina, converte posteriormente a energia mecânica de rotação da turbina em eletricidade.

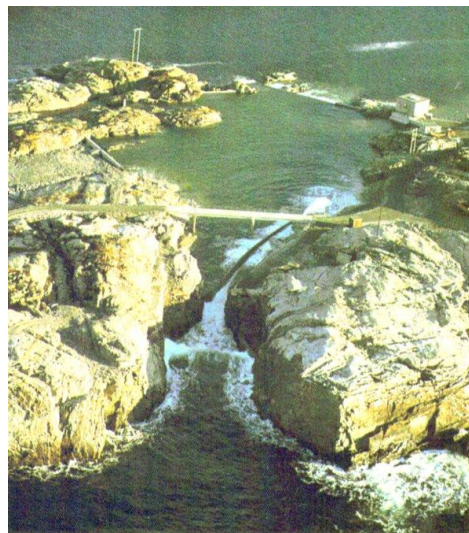


Figura 26: Dispositivo desativado do tipo "Tapchan" situado na Noruega <sup>[0.12]</sup>.

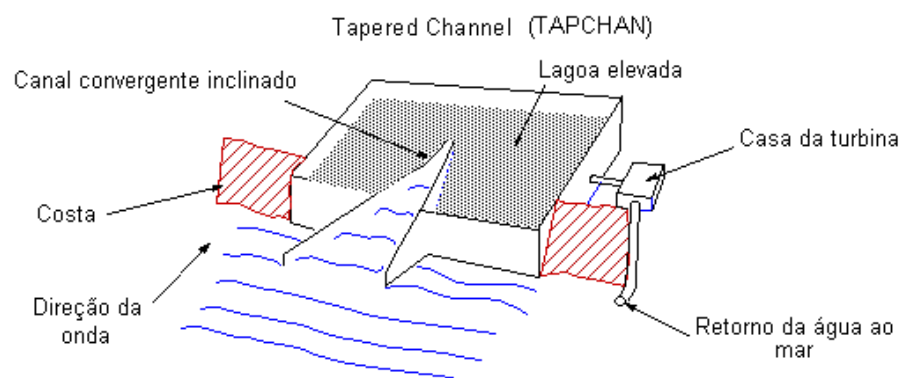


Figura 27: Esquema de funcionamento de um dispositivo do tipo "Tapchan" <sup>[0.13]</sup>.

O sistema *Wave Dragon* consiste num mecanismo flutuante desenvolvido para operar fora da costa utilizando os princípios básicos dos dispositivos de galgamento. É composto por uma estrutura em rampa de pequena dimensão e inclinação acentuada que promove a elevação das ondas incidentes conduzindo-as para um reservatório. Na zona inferior do reservatório encontram-se turbinas que são acionadas pela descarga de água acima do nível médio do mar. Uma estrutura em forma de elipse pode ser acoplada anteriormente à rampa, otimizando o efeito de elevação. Um sistema de pressurização de ar existente na estrutura do *Wave Dragon* permite ajustar a sua altura em função das quantidades de água armazenadas e da altura das ondas incidentes. As principais vantagens em relação aos restantes mecanismos instalados fora da costa destacam-se o fato de não possuir partes móveis (além das pás das turbinas), diminuindo os efeitos de fadiga dos materiais, e a possibilidade de produção de eletricidade de forma mais contínua que os restantes dispositivos apresentados.



Figura 28: Dispositivo "Wave Dragon" <sup>[0.14]</sup>.

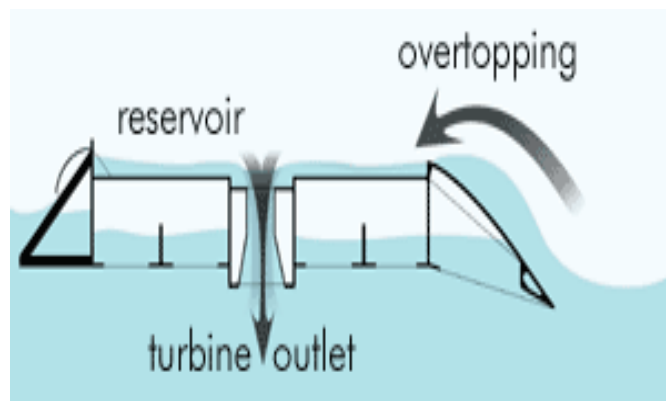


Figura 29: Esquema de funcionamento de um dispositivo do tipo "Wave Dragon" <sup>[0.14]</sup>.

Em resumo, através de uma primeira análise dos mecanismos abordados verifica-se que não existe uma linha consensual de desenvolvimento (ao contrário do que aconteceu no caso do aproveitamento da energia eólica onde a tendência seguiu o caminho da produção do aerogerador de eixo horizontal). Este fator indicia o enorme potencial que existe quando falamos em aproveitamento da energia das ondas, se bem que ao mesmo tempo revela a necessidade de percorrer um longo caminho de aperfeiçoamento a fim de tornar os modelos economicamente mais sustentáveis.

## CAPÍTULO II

### 2 Propriedades Físicas das Ondas Oceânicas

O desenvolvimento de um protótipo de extração de energia das ondas, deverá basear-se num sistema que seja capaz de maximizar a energia absorvida, mantendo as condições de integridade estrutural salvaguardadas face às exigentes condições do meio envolvente.

A realização de registos reais do comportamento oscilatório das ondas, é por isso uma ferramenta essencial para determinar quais os locais mais propícios a serem explorados e quais as características principais que os mecanismos devem comportar. As boias de monitorização, ou ondógrafos, são um dos métodos mais utilizados neste tipo de tarefa.



Figura 30: Bóia de monitorização <sup>[0.15]</sup>.

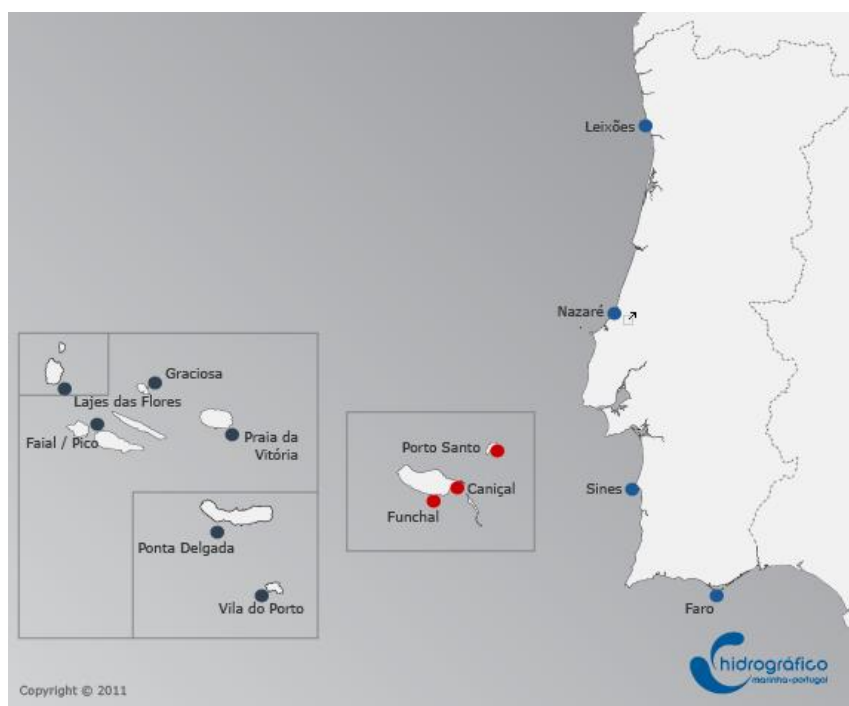


Figura 31: Distribuição das boias de monitorização das ondas em Portugal <sup>[0.16]</sup>.

Os registos obtidos pelos ondógrafos podem posteriormente ser trabalhados, permitindo a criação de gráficos onde é possível fazer a visualização dos principais parâmetros característicos das ondas.

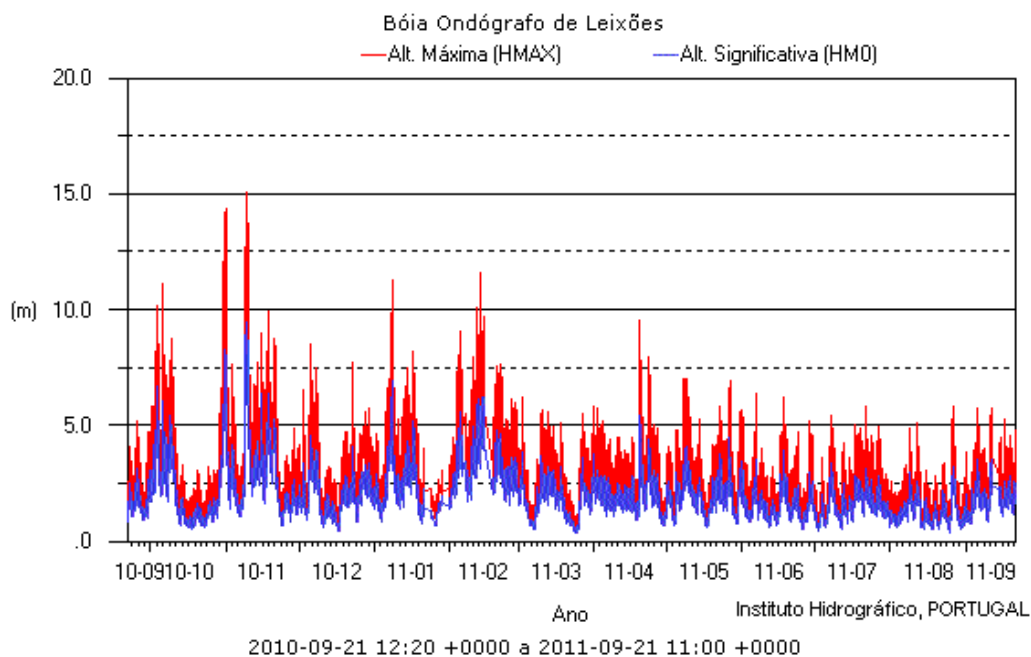


Figura 32: Altura máxima e significativa das ondas registadas entre Setembro de 2010 e Setembro de 2011 pelo ondógrafo localizado em Leixões <sup>[0.16]</sup>.

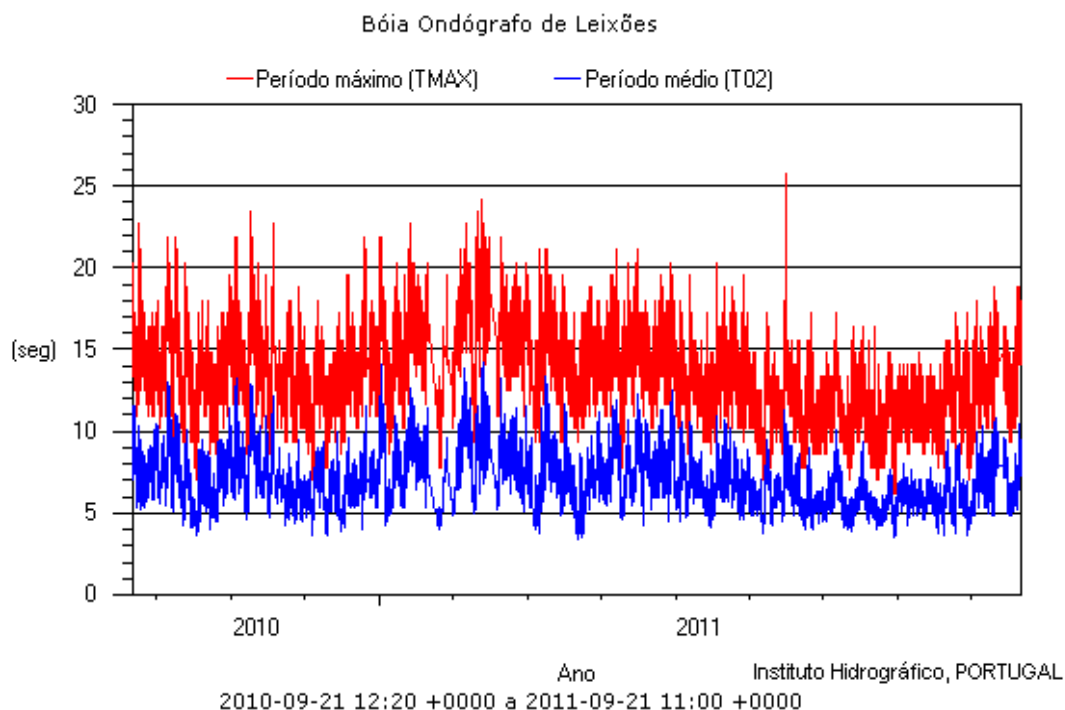


Figura 33: Período máximo e significativo das ondas registadas entre Setembro de 2010 e Setembro de 2011 pelo ondógrafo localizado em Leixões <sup>[0.16]</sup>.

A análise espectral das figuras 32 e 33 mostra que entre Setembro de 2010 e Setembro de 2011, o período médio de oscilação situa-se por volta dos 7s, e a amplitude ronda tipicamente os 2 m (podendo ocasionalmente chegar a valores bastante superiores).

Dada a imprevisibilidade e irregularidade do fenómeno, torna-se necessário adotar um modelo matemático simplificado de forma a tornar os processos de cálculo parametrizáveis.

## 2.1 Teoria linear da onda <sup>[4;5;0.03]</sup>

Quando uma tempestade atinge o mar, são geradas ondas de diferentes alturas e diferentes períodos. Ao longo da sua propagação, as ondas de baixo período tendem a desaparecer, prevalecendo as ondas de período mais elevado por vezes denominadas de *swells*. Este tipo de onda, cuja altura é reduzida quando comparadas com o seu comprimento, para além de comuns, são de especial interesse para o estudo de sistemas de aproveitamento de energia devido à sua densidade energética. Na figura 34 está representado um gráfico onde é possível verificar que as ondas formadas pelo vento e as ondas do tipo *swell* são aquelas que transportam maior quantidade de energia.

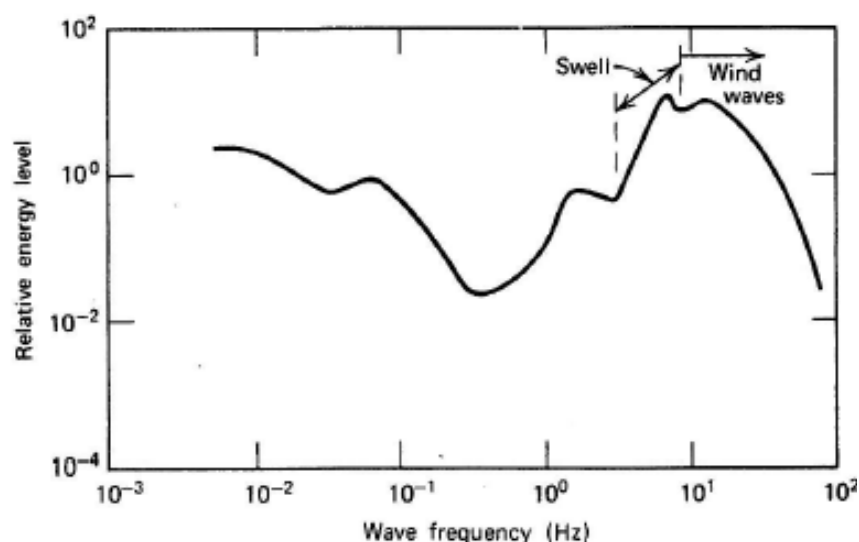


Figura 34: Espectro de níveis de energia relativa para ondas com diferentes origens <sup>[3]</sup>.

Quando razão entre a altura da onda relativamente ao seu comprimento é da ordem de 1/50 ou inferior a *teoria linear da onda* é segundo alguns autores (McCormick 1973; Sorensen 1993) uma teoria que permite descrever com alguma precisão as propriedades cinemáticas e dinâmicas da onda

Segundo esta teoria a equação que rege o movimento das ondas é linear e monocromática, e a profundidade do mar é considerada elevada comparativamente com a altura da onda. As perdas de energia devido ao atrito com o fundo marítimo e aos fenómenos de turbulência são consideradas desprezáveis.

A teoria linear da onda permite de forma simples compreender as características da onda, e sendo de fácil aplicação permite obter os resultados desejados para diversas aplicações sem ter de recorrer a métodos de cálculo de maior complexidade.

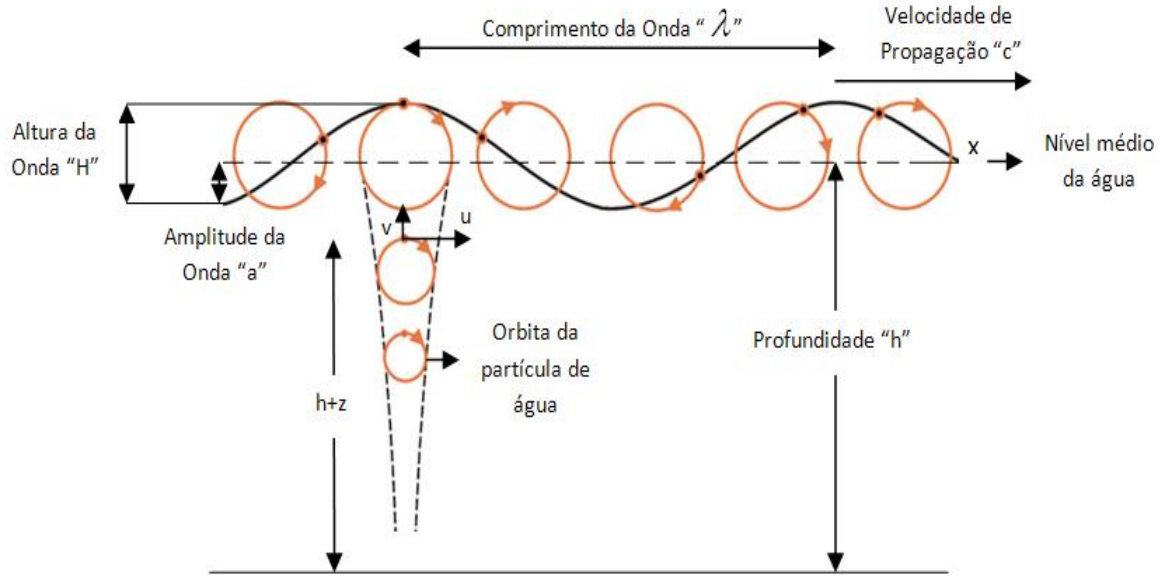


Figura 35: Definição dos parâmetros da onda a duas dimensões segundo a teoria linear.

Na figura 35 estão representadas as principais variáveis a ter em consideração numa análise de onda em propagação. Considerando uma profundidade  $h$  constante relativamente ao nível médio da água, o perfil da superfície da água  $\eta$  em função do tempo  $t$ , da altura da onda  $H$  e da posição horizontal  $x$ , é dado pela equação 1.

$$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (1)$$

O comprimento de onda  $\lambda$ , definido como o comprimento entre duas posições equivalentes de duas ondas consecutivas é função do período  $T$  de oscilação e da aceleração da gravidade  $g$ , e pode ser matematicamente representado pela equação 2.

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2)$$

O perfil superficial da onda propaga-se na direção  $x$  com uma velocidade  $c$  que não é mais do que o comprimento de onda  $\lambda$  dividido pelo período de oscilação  $T$ .

$$c = \frac{gT}{2\pi} \quad (3)$$

O número de onda  $k$  e a frequência angular  $\omega$  são dois parâmetros característicos das ondas muitas vezes tomados em consideração.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (5)$$



Durante a propagação da onda, para se completar um ciclo completo (o equivalente a um comprimento de onda na direção  $x$ ), as partículas da água da zona superficial tem que se movimentar no sentido horário, para a frente, para baixo, para trás e por fim para cima até completarem a sua órbita circular. Com a profundidade, as partículas de água vão descrevendo órbitas de menor dimensão até um limite em que a influência da onda deixa de ser sentida. Este fenómeno está representado pelas circunferências de cor laranja da figura 35.

A velocidade de propagação horizontal  $u$  e vertical  $v$  das partículas de onda são dadas em função da profundidade  $z$  pelas equações 6 e 7 respetivamente. <sup>[0.03]</sup>

$$u = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos(kx - \omega t) \quad (6)$$

$$v = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \sin(kx - \omega t) \quad (7)$$

Quando a onda se aproxima da costa, devido à diminuição da profundidade, as órbitas descritas pelas partículas vão deixar de ter a forma circular para tomar uma forma elíptica. Nestas situações as equações acima descritas deixam de ser válidas, necessitando de ser corrigidas para as novas condições. A tabela 1 apresenta um resumo das equações a usar em função da profundidade considerada.

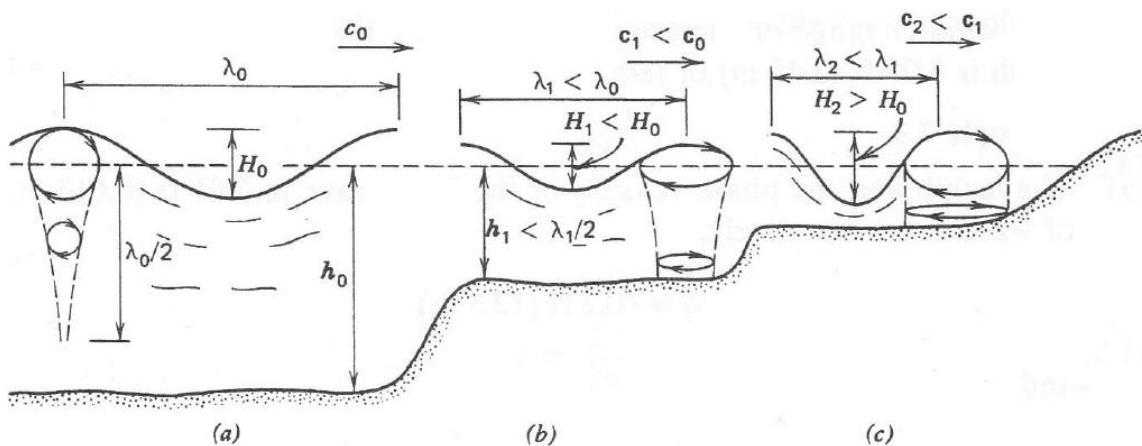
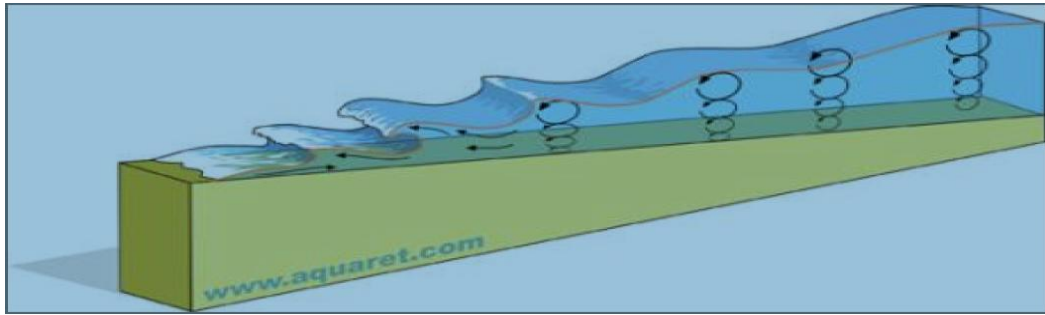


Figura 36: Perfil das ondas em função da profundidade do mar: (a) Águas profundas,  $h > \lambda/2$ ; (b) Águas de profundidade intermédia,  $\lambda/2 > h > \lambda/20$ ; (c) Águas superficiais,  $h < \lambda/20$  <sup>[0.01]; [3]</sup>



Características das ondas em função da profundidade do mar			
	Águas de baixa profundidade $h < \frac{\lambda}{20}$	Águas de profundidade intermédia $\frac{\lambda}{2} < h \leq \frac{\lambda}{20}$	Águas profundas $h \geq \frac{\lambda}{2}$
Superfície deslocada relativamente ao nível médio da água	$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right)$		
Comprimento de onda	$\lambda = \sqrt{ghT}$	$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)$	$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$
Velocidade de propagação	$c = \sqrt{gh}$	$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kh)$	$c = \frac{gT}{2\pi}$
Velocidade horizontal das partículas da onda	$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \cos(kx - \omega t)$	$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\sinh(kh)} \cos(kx - \omega t)$	$u = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos(kx - \omega t)$
Velocidade vertical das partículas da onda	$v = \frac{\pi H}{T} \frac{(z+h)}{h} \sin(kx - \omega t)$	$v = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh[k(z+h)]}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t)$	$v = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \sin(kx - \omega t)$

Tabela 1: Características físicas das ondas em função da profundidade do mar <sup>[3]</sup>.

Segundo as equações da tabela 1 é possível verificar que o comprimento da onda e a sua velocidade de propagação decrescem significativamente quando a onda se aproxima de águas pouco profundas. Por seu lado a velocidade com que as partículas descrevem o movimento de rotação aumenta, chegando ao ponto em que a velocidade horizontal iguala a velocidade de propagação da onda, originando o rebentamento. A energia da onda é então dissipada devido à turbulência e atrito com o fundo marítimo.

## 2.2 Energia da onda <sup>[0.03]; [3]; [4]; [5]</sup>

A energia contida na onda apresenta-se sob a forma de energia cinética, devido à velocidade de propagação das partículas da água, e na forma de energia potencial resultante da elevação de uma quantidade de massa de água acima do nível médio de referência.

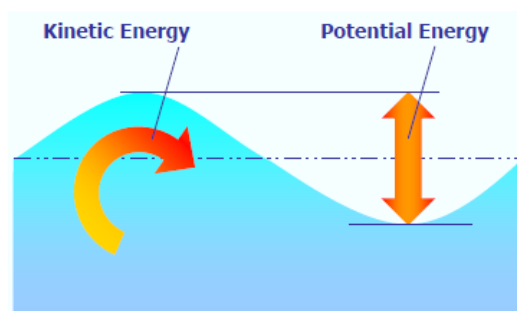


Figura 37: Energia da cinética e potencial da onda <sup>[0.06]</sup>.

Considerando a onda representada na figura 38, o elemento de massa de água por unidade de largura acima do nível médio do mar é dado pela equação 8:

$$\Delta m = \rho \eta \Delta x \quad (8)$$

Onde  $\Delta x$  representa a largura do elemento de água considerado e  $\rho$  é a densidade volumétrica da água do mar cujo valor ronda habitualmente  $1030 \text{ kg/m}^3$ .

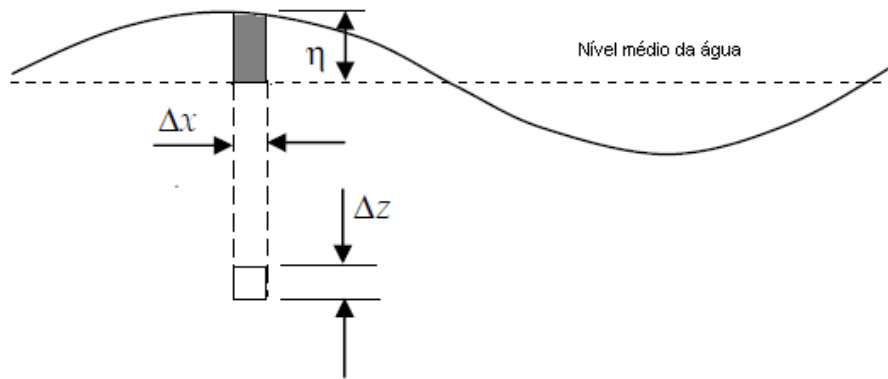


Figura 38: Perfil de uma onda a duas dimensões segundo a teoria linear <sup>[5]</sup>.

A energia potencial de uma onda ao longo de uma oscilação completa pode ser obtida da seguinte forma:

$$E_p = \int_0^\lambda \frac{\Delta m g \eta}{2} = \int_0^\lambda \frac{\rho g \eta^2}{2} dx = \frac{\rho g H^2}{8} \int_0^\lambda \cos^2(kx - \omega t) dx = \frac{\rho g a^2 \lambda}{16} \quad (9)$$

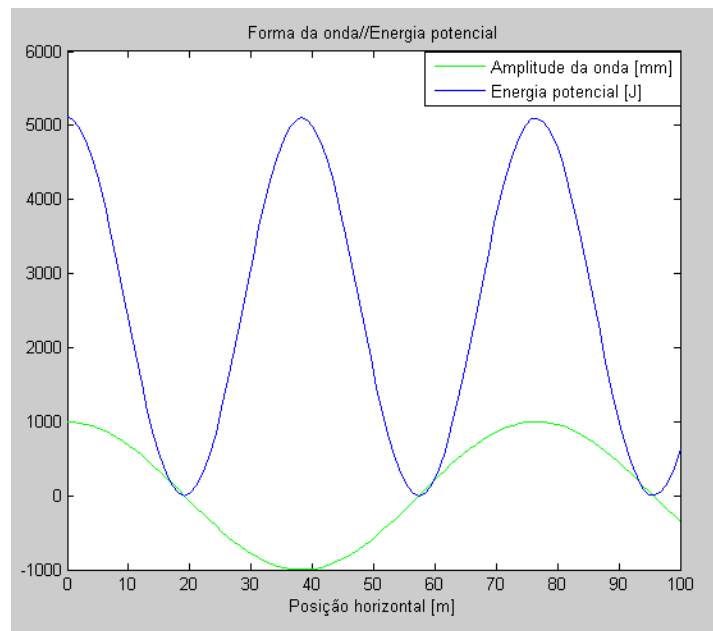


Figura 39: Gráfico do comportamento instantâneo da onda e energia potencial associada, segundo a teoria linear considerando uma onda com amplitude de 2 metros e um período de 7 segundos.

Por sua vez, a energia cinética de um elemento de água submerso por unidade de largura, como o representado na figura 38, pode ser obtido pela equação 9:

$$E_c = \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) \Delta x \Delta z \quad (9)$$

Onde  $u$  e  $v$  representam respetivamente a velocidade horizontal e vertical das partículas da onda durante o seu movimento rotacional.

A energia cinética total por unidade de largura ao longo de uma oscilação completa é dada pela equação 10:

$$E_c = \int_0^\lambda \int_{-z}^0 \frac{1}{2} (u^2 + v^2) dx dz \approx \frac{\rho g H^2}{16} \quad (10)$$

Uma vez que a velocidade  $u$  e  $v$  das partículas da água diminuem com a profundidade, a energia cinética da onda também é cada vez menos significativa à medida que nos aproximamos do fundo.

A equação 11 <sup>[0.03]</sup> permite determinar a energia cinética acumulada até uma determinada profundidade  $z$ .

$$E_c(z) = \frac{\rho \omega^2 H^2}{16k} (1 - e^{-2kz}) \quad (11)$$

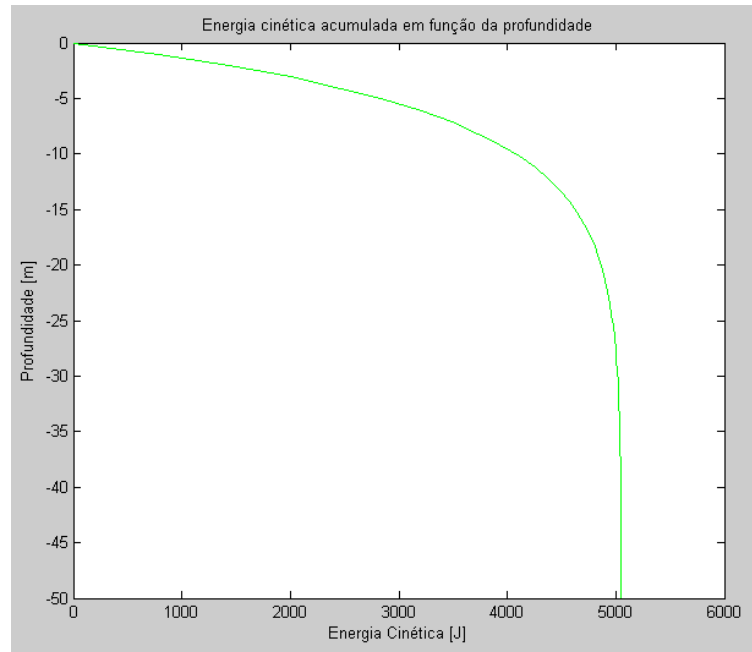


Figura 40: Gráfico da distribuição da energia cinética acumulada em função da profundidade para uma onda com uma altura de 2m e um período de 7 segundos.

A análise do gráfico da figura 40 permite constatar que cerca de 80% da energia cinética concentra-se nos primeiros 10 m de profundidade.

Uma vez que a energia potencial está concentrada à superfície, conclui-se que o mecanismo a desenvolver deverá ocupar a região superficial do mar por ser a região com maior fluxo de energia.

A energia total da onda é composta pela soma das componentes da energia cinética e energia potencial e é quadraticamente proporcional à altura da onda, conforme expresso pela equação 12.

$$E_T = E_c + E_p = \frac{\rho g H^2 \lambda}{8} \quad (12)$$

A transferência de energia de ponto para ponto ao longo do percurso da onda é caracterizada pelo fluxo de energia ou potência da onda por unidade de largura. Este parâmetro pode ser obtido através da multiplicação da energia total da onda pela sua velocidade e é representado pela equação 13:

$$P = \frac{\rho g H^2 c_g}{8} \quad (13)$$

Na equação 13,  $c_g$  representa o chamado grupo de velocidade, que é aproximadamente igual à velocidade de propagação  $c$  para águas de baixa profundidade e igual a  $c/2$  para águas profundas. <sup>[3]</sup>

Segundo a teoria linear para águas profundas, uma onda de 2 m de amplitude e um período de oscilação de 7s, transporta 386 kJ/m de energia e tem uma potência disponível de 27,6 kW/m.

## CAPÍTULO III

### 3 Conversão da energia das ondas

*“We begin our discussion by starting a basic principle, namely, that any technique that can effectively create waves can also be used to extract wave energy”* <sup>[3]</sup>

*“A good wave maker is a good wave absorber.”* <sup>[0.03]</sup>

*“To convert the energy of the moving water particles, we must design a device that will have motions that are approximately those of the particles.”* <sup>[3]</sup>

Um sistema conversor de energia tem como principal objetivo a transformação da energia hidrodinâmica armazenada nas ondas em energia cinética capaz de mover um mecanismo de reação que por sua vez a converterá em energia elétrica utilizável.

A escolha da solução a projetar terá de ter em consideração o compromisso entre o custo da instalação e a eficiência mecânica da conversão de energia.

A figura 41 mostra o efeito idealístico da sobreposição dos movimentos oscilação e rotação que ocorrem quando a onda interage com um flutuador em ressonância.

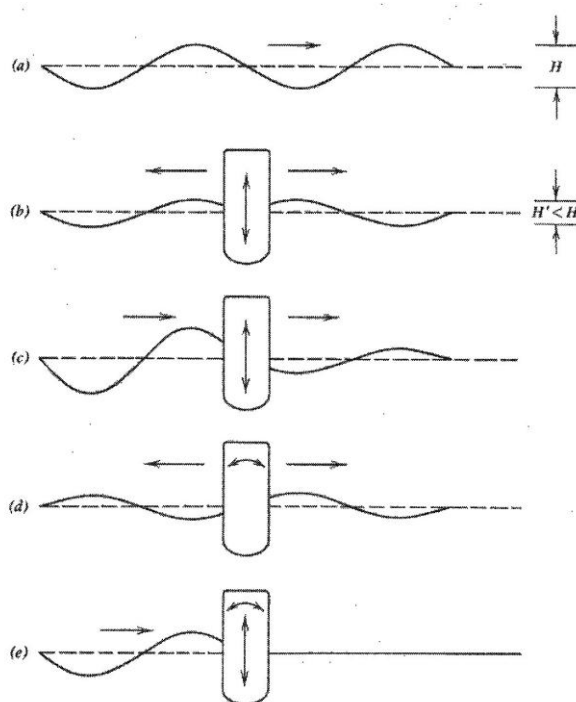


Figura 41: Representação do efeito da sobreposição das ondas incidentes com as ondas geradas pelo flutuador <sup>[3]</sup>.

A onda representada no esquema (a) da figura 41, excita o flutuador representado em (b) promovendo o seu movimento de translação vertical. Por sua vez o flutuador irradia ondas de igual frequência mas menor amplitude comparativamente com a onda original quando entra em ressonância (b). Este fenómeno é conhecido por “Efeito Antena”.

A sobreposição das ondas incidentes e geradas pelo flutuador, resulta num aumento da amplitude da onda a montante do flutuador e uma diminuição da amplitude da onda a jusante (c). Se para além de oscilar, o flutuador tiver liberdade de rotação, as ondas por ele irradiadas, devido ao Efeito Antena, estarão desfasadas  $180^\circ$  da onda incidente (d). O resultado teórico da sobreposição destes efeitos corresponde à total absorção da energia contida na onda (e).

Para além das diferentes configurações que as estruturas móveis de interação com as ondas possam assumir, os sistemas de conversão de energia podem ainda diferenciar-se pela forma como estão ligados às estruturas de suporte.

Segundo esta classificação os mecanismos podem subdividir-se em mecanismos de reação com referência fixa, mecanismos de reação fixos a uma estrutura móvel e mecanismos de reação livres ou de reação inercial. A figura 42 representa estes três tipos distintos de sistemas.

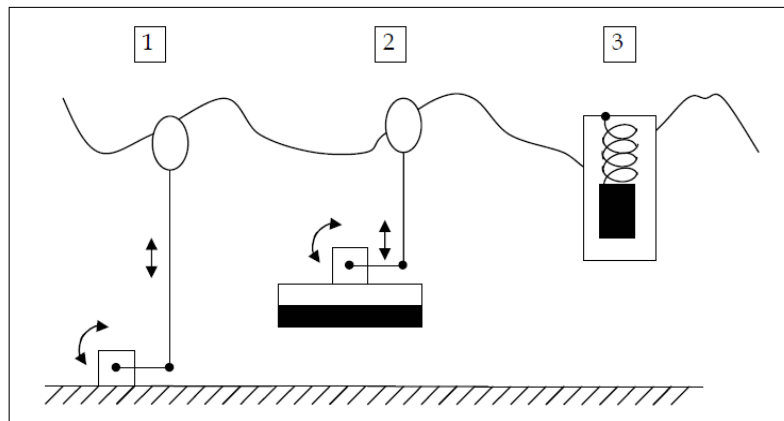


Figura 42: Exemplo do funcionamento de três tipos de mecanismos de reação. 1-Mecanismo de reação com referência fixa; 2- Mecanismo de reação com plataforma móvel; 3 Mecanismo de reação inercial <sup>[0.03]</sup>.

## CAPÍTULO IV

### 4 Projeto de um sistema de conversão de energia das ondas

O protótipo desenvolvido neste trabalho é do tipo atenuador, cuja interação com as ondas é feita através de um flutuador desenvolvido em 1974 que ficou conhecido por “*Nodding Duck*”<sup>[1]</sup>.

O flutuador transmite por via de correntes de rolos o movimento de rotação oscilante com a uma caixa de velocidades onde o movimento oscilatório é retificado e a velocidade de rotação é multiplicada.

Um gerador elétrico ligado à caixa de velocidades transforma a energia mecânica de rotação do veio de saída em energia elétrica.

A eletricidade gerada é posteriormente tratada, para que possa ser transportada por meio de cabos até a um posto de transformação existente em terra de onde sairá para a rede de consumo

Todo os componentes do sistema estão apoiados numa estrutura de suporte móvel e semi-submersa.

#### 4.1 Flutuador do tipo “*Nodding Duck*”

Em 1974 Stephen Salter desenvolveu um flutuador com um perfil inovador, que ficou conhecido por “*Nodding Duck*”. Segundo testes efetuados com este flutuador verificou-se ser possível absorver 89% da energia contida na fração de onda incidente.

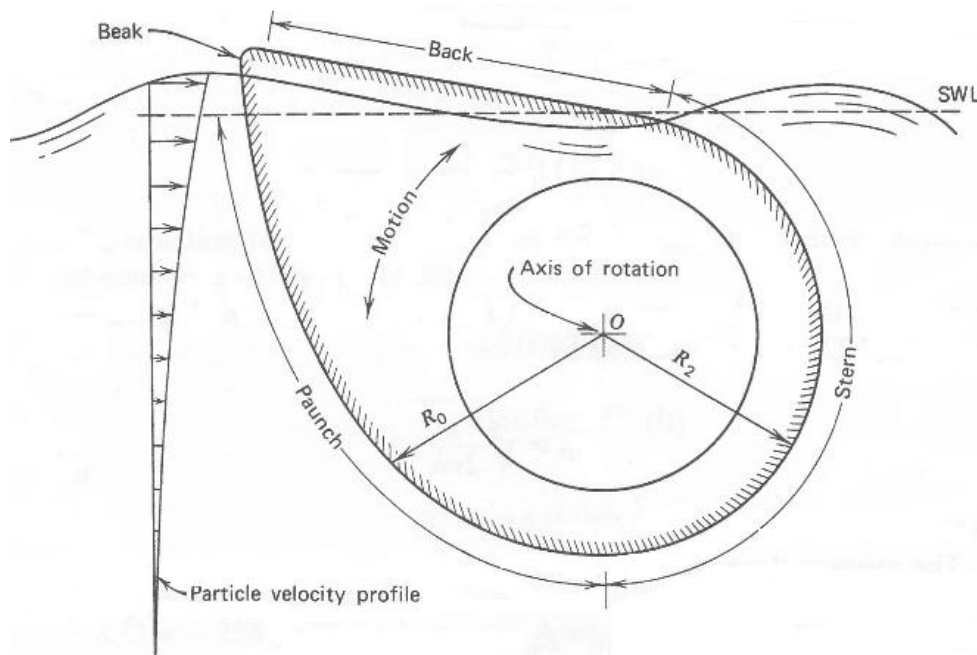


Figura 43: Vista de perfil de um flutuador do tipo “*Nodding Duck*”<sup>[3]</sup>.

O princípio de funcionamento deste tipo de flutuador é o seguinte:

- A pressão dinâmica induzida pelas partículas da onda incidente forçam o flutuador a rodar em torno do centro de rotação ‘O’. Adicionalmente à pressão dinâmica, a mudança da pressão hidrostática contribui para a rotação, promovendo a subida e descida da parte mais estreita do flutuador.

Uma vez que o centro de massa do corpo não coincide com o centro de rotação, quando excitado o flutuador não está apenas a aproveitar a energia cinética de rotação, mas está também a elevar o seu centro de massa, aumentando a sua energia potencial. A conjugação destes movimentos tem um efeito idêntico ao descrito no capítulo 3 e representado pela figura 41.

A tabela 2 mostra a relação entre a potência disponível na onda, em função do seu período e altura, e a potência disponível ao flutuador em função da sua dimensão.

Altura da Onda ‘H’ [m]	Período da Onda ‘T’ [s]	Energia da Onda [KJ/m]	Potência da Onda [KW/m]	Dimensão característica do Flutuador ‘R2’ [m]	Potência disponível ao flutuador [KW/m]	Potência máxima absorvida pelo flutuador [KW/m], considerando um rendimento de funcionamento de 89%
1	5	49,29	4,92	1,95	3,53	3,14
1	7	96,62	6,90	3,82	4,94	4,39
1	10	197,20	9,86	7,80	7,05	6,28
2	5	197,20	19,72	1,95	14,10	12,55
2	7	386,51	27,60	3,82	19,75	17,58
2	10	788,79	39,44	7,80	28,21	25,11
3	5	443,69	44,36	1,95	31,71	28,25
3	7	869,64	62,11	3,82	44,43	39,55
3	10	1774,79	88,73	7,80	63,48	56,50
4	5	788,79	78,79	1,95	56,43	50,22
4	7	1546,04	110,43	3,82	79,00	70,31
4	10	3155,18	157,75	7,80	112,85	100,44

Tabela 2: Variáveis energéticas das ondas e potência disponível ao flutuador considerando diferentes alturas e períodos de onda.

No cálculo da potência disponível ao flutuador por unidade de largura, foi usada a fórmula de cálculo número 14 que nos dá a variação da potência em função da profundidade <sup>[3]</sup>.

$$P_D = \frac{\rho g H^2 c}{16} (1 - e^{-2kz}) \quad (14)$$

Neste caso ‘z’ representa a altura submersa do flutuador e que é aproximadamente igual a 2 vezes o raio R2. Quanto às restantes variáveis,  $\rho$  é a densidade da água do mar,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $H$  é a altura da onda,  $c$  é o grupo de velocidade, e  $z$  é o número de onda.





$$f_D = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\frac{1}{3} \rho \times g \times L_D^3 \times B - M \times g \times r_D \times \sin(\Lambda)}{\frac{1}{16} \times \pi \times \rho \times B \times \left[ \left( \frac{L_D}{\cos(\Lambda)} \right)^2 - R_2 \right]^2}} \quad (15)$$

Na equação acima  $M$  representa a massa do flutuador, e pode ser calculada multiplicando o volume submerso do flutuador, pela densidade da água do mar.

$$M = \rho \times B \times \left( \frac{\pi \times R_2^2}{2} + 0,222 \times \pi \times (R_o^1)^2 + 0,5(R_o^1)^2 \times \sin(10^\circ) \times [\cos(10^\circ) + \tan(10^\circ)] \right. \\ \left. + \frac{R_2 \times L_D}{2} - \frac{(R_o^1)^2}{8^2} \tan(10^\circ) \right) \quad (16)$$

As variáveis  $L_D$ ,  $R_2$ ,  $r_D$ ,  $R_o^1$  e  $\Lambda$ , dizem respeito a características geométricas do flutuador e podem ser identificadas na figura 44.

$$R_2 = \frac{\lambda}{20} \quad (17)$$

$$r_D = 0,0292 \times \lambda \times e^{\frac{2 \times \pi \times z}{\lambda}} \quad (18)$$

$$R_o^1 = 1,5 \times R_2 \quad (19)$$

$$L_D = \sqrt{(R_o^1)^2 - R_2^2} \quad (20)$$

$$\Lambda = \cos^{-1} \left( \frac{L_D}{R_o^1} \right) \quad (21)$$

A condição de ressonância pode obter-se por via de uma deslocalização de massas dentro do flutuador de modo que a posição do centro de massa  $r_D$ , garanta a solução da equação número 22:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\frac{1}{3} \rho \times g \times L_d^3 \times B - M \times g \times r_D \times \sin(\Lambda)}{\frac{1}{16} \times \pi \times \rho \times B \times \left[ \left( \frac{L_D}{\cos(\Lambda)} \right)^2 - R_2 \right]^2}} \quad (22)$$

No local considerado para a realização deste estudo o flutuador deverá apresentar as dimensões apresentadas na tabela 4.

Características geométricas do flutuador	
R2	1,951 m
$R_o^1$	3,657 m
$L_D$	3,093 m
$r_D$	0,826 m
$\Lambda$	32,25 °
B	20 m

Tabela 4: Dimensões geométricas propostas para o flutuador de testes.

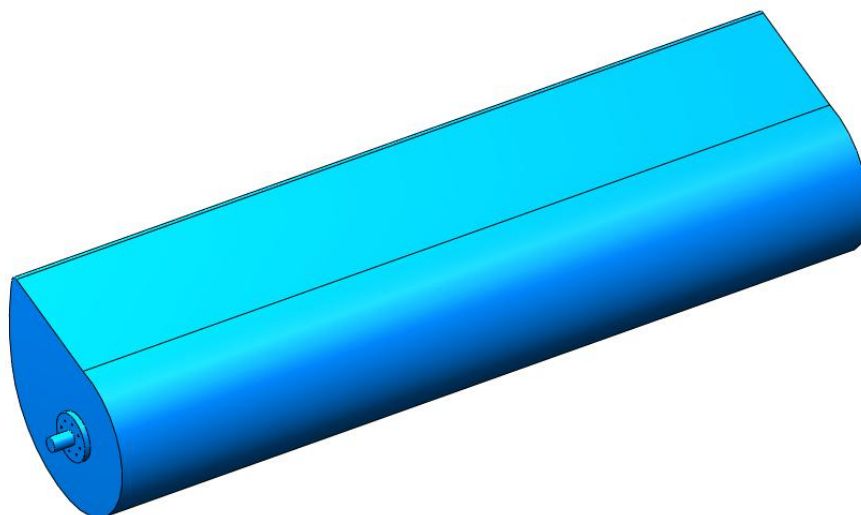


Figura 45: Modelo de um flutuador do tipo “*Nodding Duck*” com 20 m de comprimento.

#### 4.2.2 Estrutura de suporte do flutuador.

A estrutura de apoio ao flutuador será também flutuante e estará ancorada ao fundo marítimo através de quatro correntes metálicas. Esta solução, para além de economicamente mais viável, é também de mais fácil instalação e estruturalmente mais resistente a esforços de flexão quando comparado com um sistema solidamente ligado ao fundo do mar.

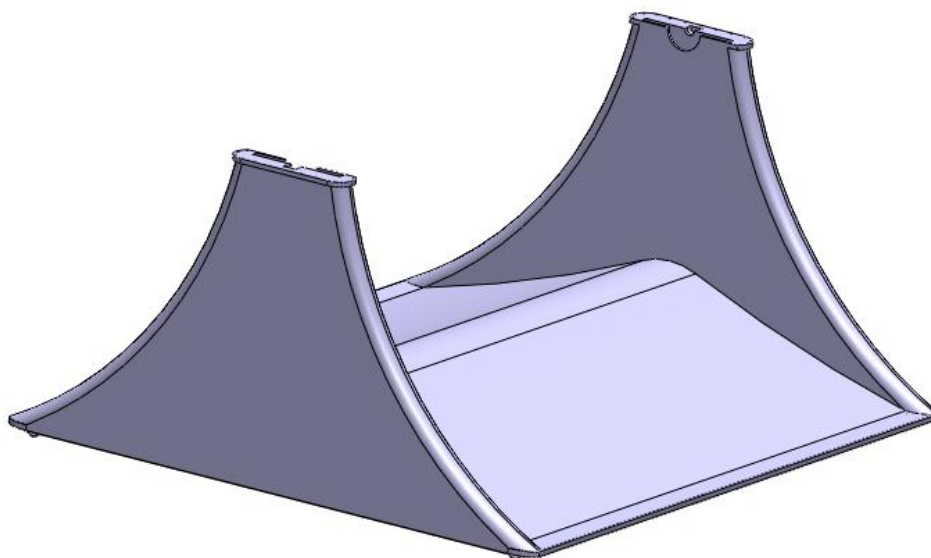


Figura 46: Estrutura de suporte do flutuador.

Uma característica particular da sua geometria tem a ver com a rampa existente junto à base, que permite a elevação da altura da onda captada, aumentando a zona de interação entre a onda e o flutuador.

Um benefício adicional ao funcionamento do sistema é o que se espera obter com o efeito do aumento de pressão de água acima do nível médio do mar durante a crista da onda. Nesse momento a plataforma é empurrada para baixo auxiliando a ascensão da parte mais estreita do flutuador. Com a passagem da crista da onda, e consequente diminuição da pressão, a plataforma tenderá a ascender para posição de referência, e o flutuador irá rodar em sentido contrário, devido à força gravítica que atua no seu centro de massa.

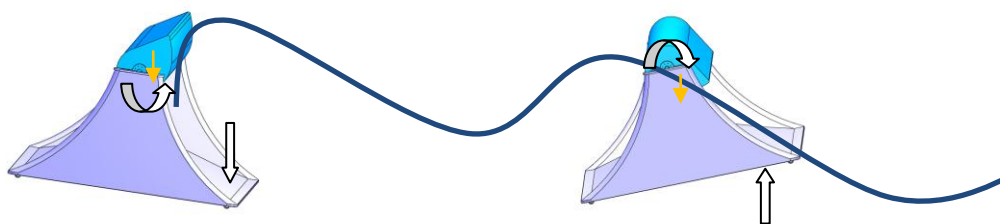


Figura 47: Princípio de funcionamento do mecanismo.

A estrutura deverá ser oca permitindo criar níveis de flutuabilidade diferentes, em função do peso que esta irá suportar. Desta forma é possível garantir uma correta localização do flutuador em relação ao nível médio do mar.

O efeito pêndulo é um fenómeno que poderá verificar-se e que auxiliará o funcionamento do sistema. Esta ocorrência é esperada principalmente quando incidirem ondas de maior dimensão sobre a estrutura, fazendo com que esta rode sobre o eixo de apoio do flutuador e em sentido contrário a este. A força da gravidade será responsável por restituir a plataforma à sua posição inicial.

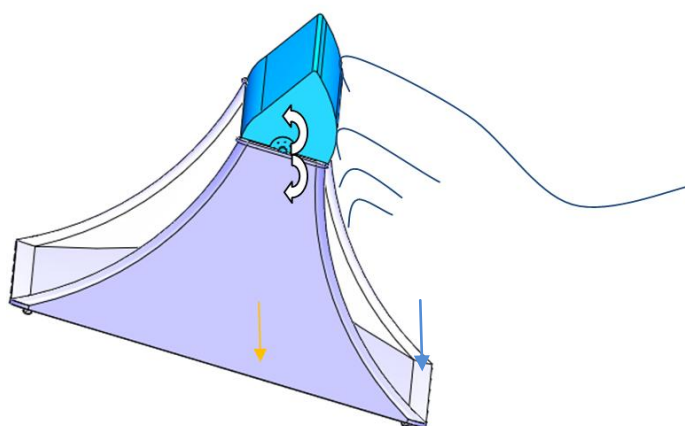


Figura 48: Efeito pêndulo da estrutura de suporte.

Os pórticos de apoio do flutuador foram desenhados para auxiliar paralelismo entre a frente de onda e o flutuador, evitando que o mecanismo tome posições menos favoráveis à captação da energia.

#### 4.2.3 Sistema de Ancoragem ao fundo marítimo

O sistema de ancoragem foi concebido de forma confinar a área ocupada pelo mecanismo, e manter a sua integridade estrutural face aos esforços provocados pelos ventos, ondas e correntes marítimas.

Em 1978 Mr.Carmichael publicou os resultados <sup>[0.08]</sup> obtidos de um estudo realizado num tanque onde testou a duas dimensões e sob condições de ondas sinusoidais o flutuador “*Nodding Duck*”, confirmando as publicações de Stephen Salter dois anos antes acerca da eficiência de 89% deste tipo de flutuador.

Posteriormente Mr.Carmichael conduziu testes sobre o mesmo modelo a três dimensões e verificou que os valores da eficiência de conversão de energia subiram acima do que era expectável para valores da ordem dos 150% para ondas alinhadas frontalmente com o eixo de rotação do flutuador.

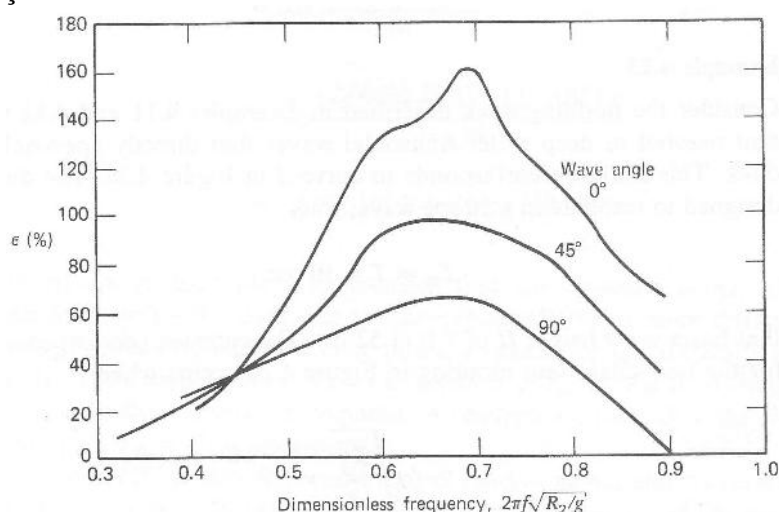


Figura 49: Eficiência do flutuador “*Nodding Duck*” em função da frequência adimensional, considerando diferentes ângulos de incidência da onda. Resultados obtidos por Mr.Carmichael (1978). <sup>[0.08]</sup>

Existem duas teorias que podem explicar este fenómeno aparentemente anómalo. A primeira considera a possibilidade de ter ocorrido um fenómeno de reflexão nas paredes do tanque, com o consequente aumento da altura da onda incidente face à onda inicialmente gerada. E a segunda relacionada com o “Efeito Antena” abordado no Capítulo III.

Mr.Carmichael realizou posteriormente estudos onde testou os efeitos de ancoragem na frequência de oscilação do flutuador e em que medida este efeito se refletia na eficiência de conversão de energia.

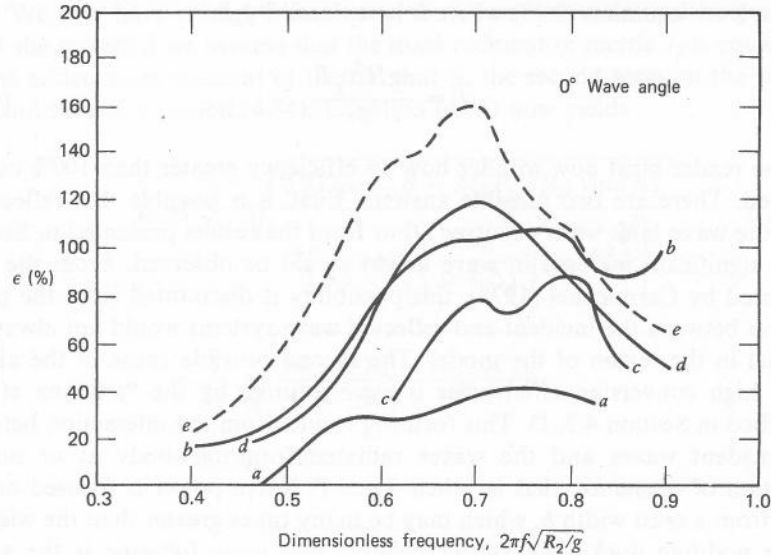


Figura 50: Eficiência do flutuador “Nodding Duck” em função da frequência adimensional considerando diferentes tipos de ancoragem: a) amarração folgada; b) amarração firme por corrente; c) amarração simples; d) amarração firme por quatro correntes; e) amarração por estrutura rígida [3].

No caso particular do protótipo que estamos a desenvolver, a frequência adimensional é dada pela equação 23:

$$\frac{2 \times \pi}{T} \times \sqrt{\frac{R_2}{g}} = \frac{2 \times \pi}{5} \times \sqrt{\frac{1,951}{9,81}} = 0,56 \quad (23)$$

Uma vez que se pretende que o sistema possa operar em alto mar, e devido aos elevados custos que poderia ter uma estrutura rigidamente ancorada ao fundo, optou-se por um sistema de ancoragem por meio de quatro cabos de ligação ao fundo marítimo. Esta solução é segundo os estudos de Mr.Carmichael a segunda melhor opção em termos de eficiência de aproveitamento de energia, como pode ser constatado na figura 50.

O valor da frequência adimensional do nosso sistema apenas nos permite obter uma eficiência de 60% (figura 50), o que corresponde a metade da eficiência máxima possível de obter para a curva “d” segundo as observações de Mc.Carmichael.

Como forma de otimizar a energia absorvida, a frequência deverá rondar o valor de 0.7 (valor que maximiza a eficiência de conversão de energia do flutuador segundo a curva d representada na figura 50), o que corresponde a um período de oscilação do sistema ‘ $T_D$ ’ de 4 segundos. Esta alteração consegue-se intervindo sobre a localização do centro de massa do flutuador.

Substituindo o valor de  $T=5s$  por  $T_D=4s$ , e mantendo as restantes características geométricas do flutuador, obtemos o novo valor para a localização do centro de massa de  $r_D=0,627$  m.

Para atuar sobre estes valores a estrutura interna do flutuador não deve ser rígida, permitindo por via de redistribuição de massas adequar a localização do centro de massa de tal forma que o sistema possa responder à excitação externa em condições próximas da ressonância e, consoante as condições de ancoragem fazer um ajuste do valor de  $r_D$  para que o sistema global funcione no regime de máxima energia absorvida.

Entre os principais componentes do sistema de ancoragem podemos destacar, as correntes metálicas, as cordas de nylon e as âncoras.



Figura 51: Corrente metálica (esquerda); Corda de nylon (direita).

A ligação entre a estrutura de fixação do flutuador e a âncora é feita, na sua maior extensão, por uma corda de nylon especialmente desenvolvida para aplicações marítimas. Junto à âncora a ligação é feita por uma corrente metálica devido à sua maior resistência ao desgaste promovido especialmente pelas deslocções de areia. A ligação à estrutura de fixação do flutuador é também feita por corrente metálica por uma questão de maior resistência ao desgaste e à maior severidade das correntes junto da superfície.



Figura 52: Âncora do tipo Danforth.



Figura 53: Principais componentes do sistema de ancoragem.

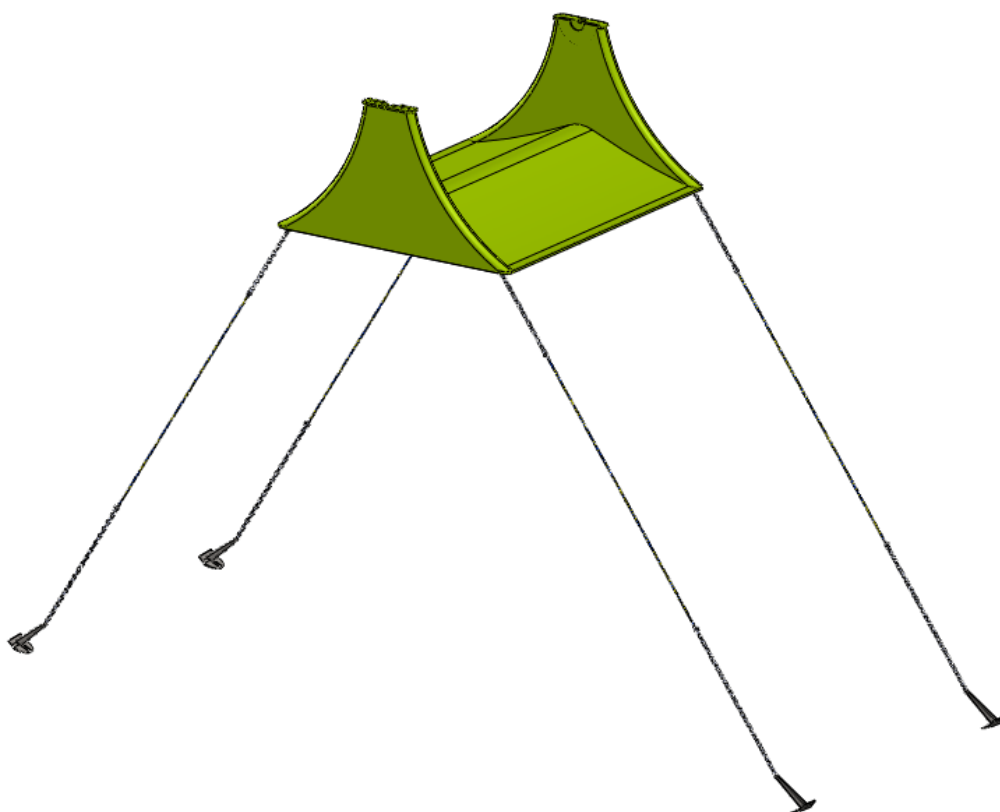


Figura 54: Modelo representativo da estrutura de suporte do flutuador ancorada.

#### 4.2.4 Caixa de velocidades

Devido à baixa velocidade de rotação do flutuador, aproximadamente 23 rpm em movimento alterno, torna-se necessário a adaptação de uma caixa de velocidades, que permita a correção do movimento alterno para um movimento retificado e multiplique a velocidade do veio de entrada para valores próximos da rotação nominal de um gerador elétrico a acoplar na sua saída.





À saída do veio 3 a velocidade de rotação necessita de ser multiplicada, usando-se para isso um sistema do tipo planetário. Os planetas 7 ligados ao veio 3, transmitem o movimento ao solar 8 talhado no veio 4.

Na extremidade oposta do veio 4 localiza-se a polia 10 que transmitirá por via de correias a potência necessária ao funcionamento de um gerador elétrico.

O método de anteprojeto seguido baseou-se no modelo proposto por Henriot e pode ser consultado com maior detalhe nos anexos deste documento.

A multiplicação de rotação conseguida por esta caixa é de 24 vezes, através de uma relação de transmissão de 3 vezes entre o veio 2 e o veio 1, e uma relação de transmissão de 8 vezes entre o veio 4 e o veio 3. Desta forma conseguimos uma velocidade à saída da caixa de aproximadamente 552 rpm.



Figura 56: Modelo representativo do funcionamento das engrenagens da caixa de velocidades.

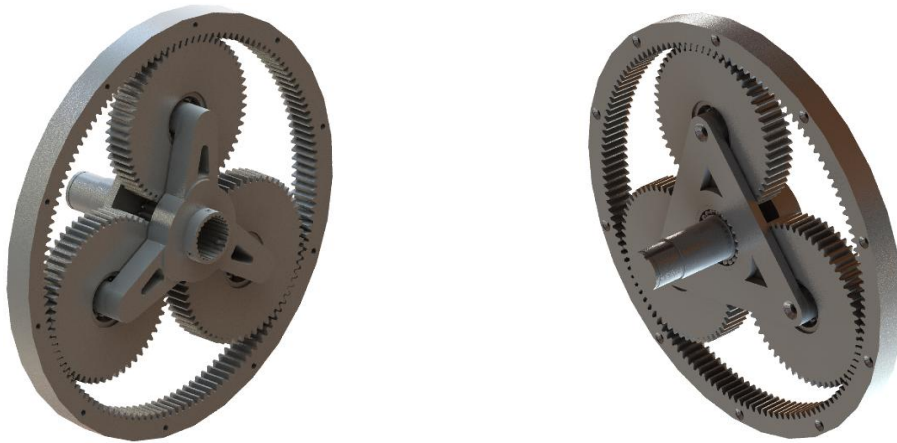


Figura 57: Detalhe do sistema planetário

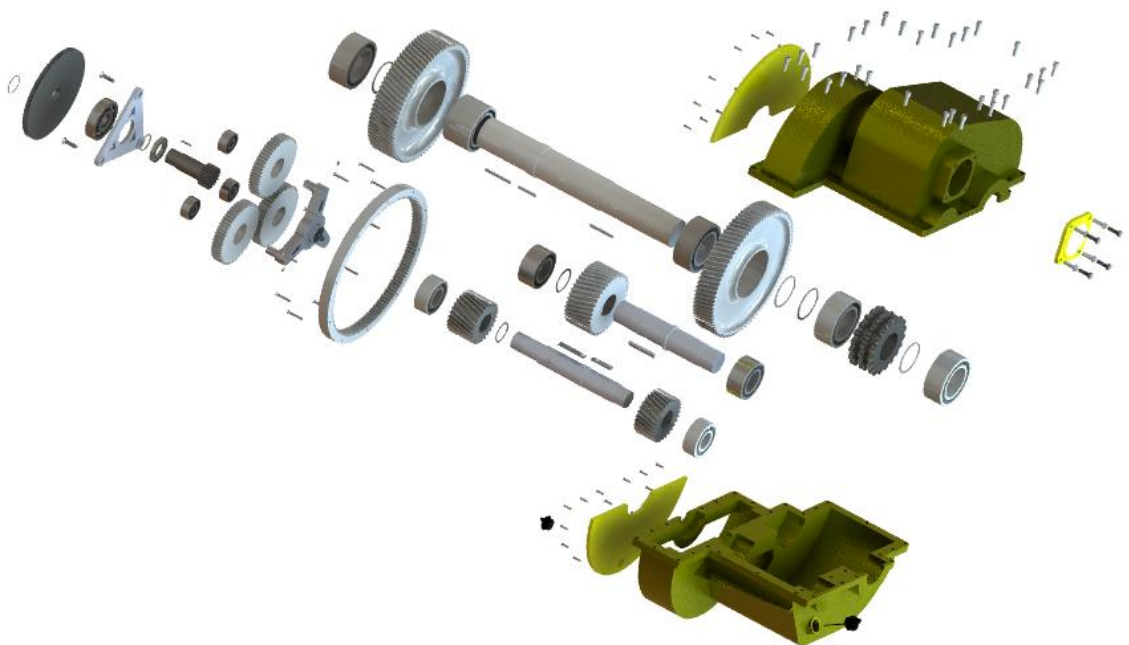


Figura 58: Perspetiva explodida de todos os componentes da caixa de velocidades.

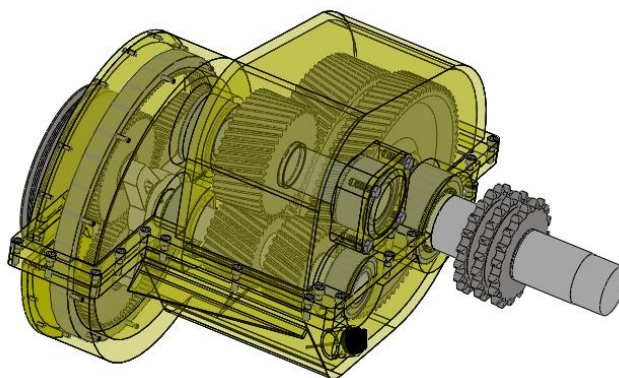


Figura 59: Desenho de conjunto da caixa de velocidades.

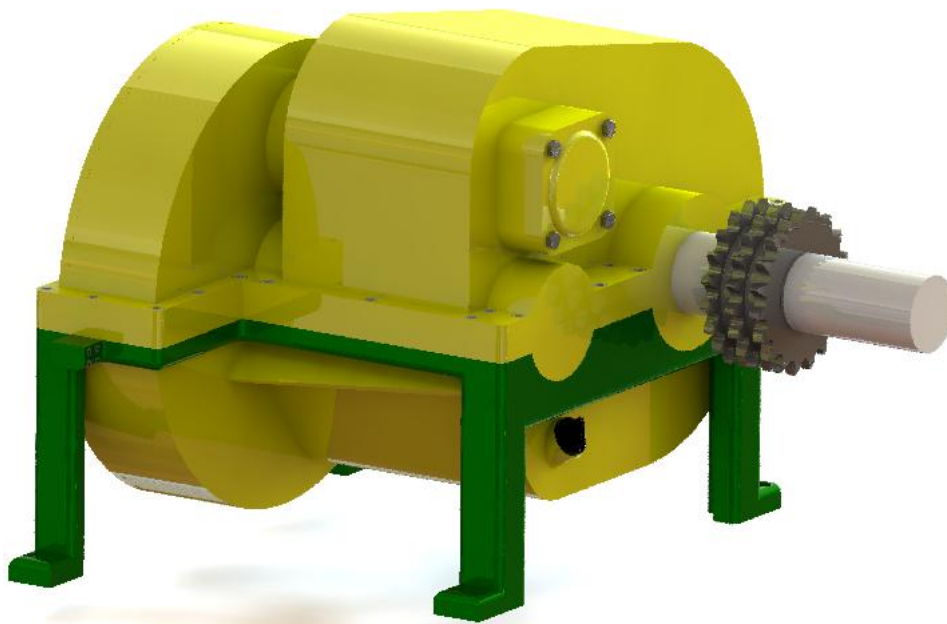


Figura 60: Fotorrealismo da caixa de velocidades com os apoios de fixação à estrutura de suporte.

#### 4.2.5 Transmissão de potência

A transmissão de potência entre o flutuador e a caixa de velocidades é realizada por via de uma corrente de rolos, que liga o pinhão da caixa de velocidades a uma roda solidamente unida com o flutuador

A corrente selecionada foi uma corrente tripla de passo 50.80 mm, cujo material de composição deverá permitir uma elevada resistência à corrosão provocada pela humidade e salinidade do meio.

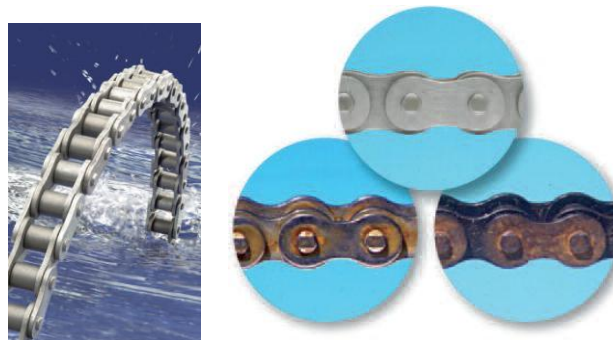


Figura 61: Corrente de rolos simples desenvolvida para resistir a ambientes corrosivos (esquerda). Comparação entre o nível de corrosão de uma corrente desenvolvida com a tecnologia Hidro-Service, com uma corrente de aço-carbono ou de niquelagem convencional, após 14 dias em contacto não permanente com água salgada (direita).<sup>[0.17]</sup>

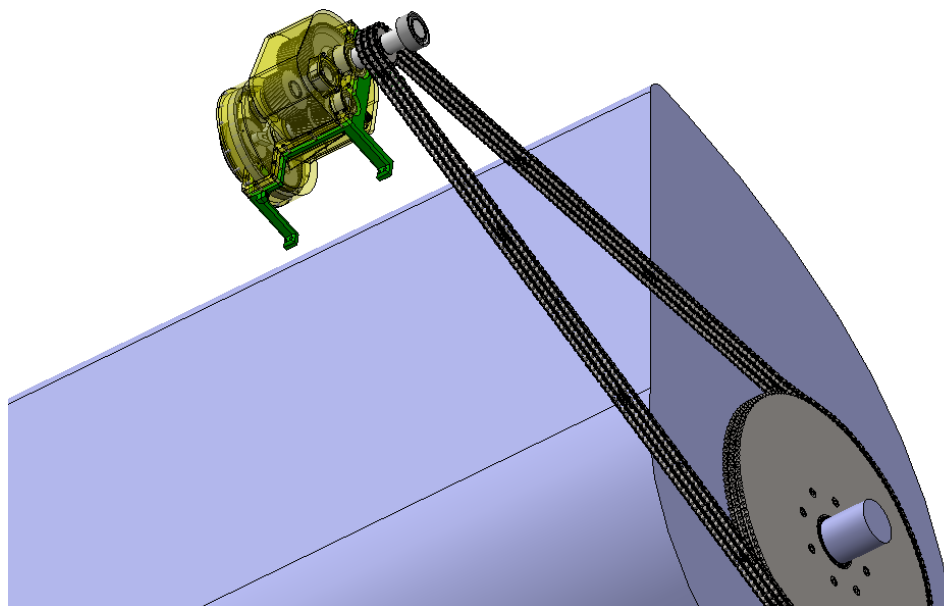


Figura 62: Ligação entre o flutuador e a caixa de velocidades.

#### 4.2.6 Transformação de energia.

Apresenta-se na figura 63 o sistema de conversão da energia proveniente da fonte hidrodinâmica para o gerador elétrico.

A polia de saída da caixa de velocidades transmite o movimento de rotação, por via de correias, a um gerador elétrico. A relação de transmissão desta ligação é de 3 vezes, o que permite uma velocidade de rotação máxima do veio do gerador de 1656 rpm.

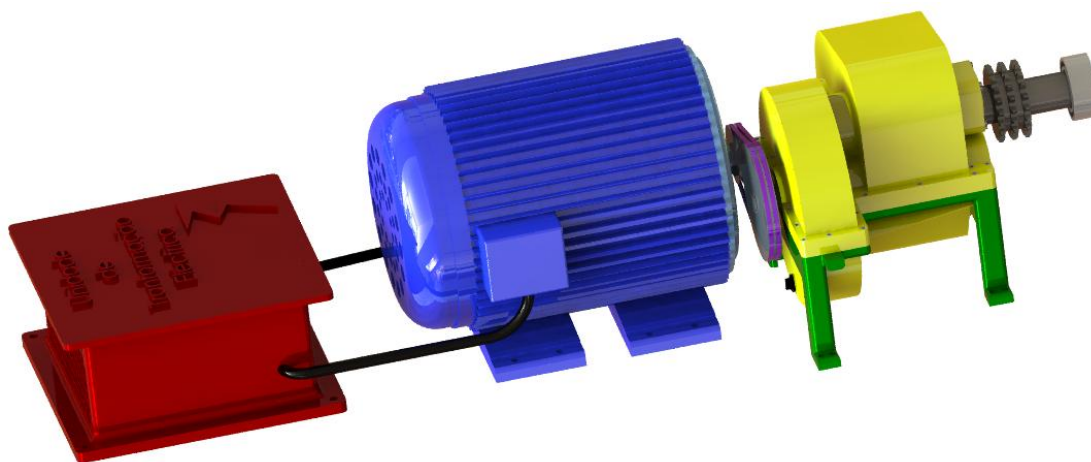


Figura 63: Sistema de conversão de energia mecânica em energia elétrica.

A energia elétrica fornecida pelo gerador passa posteriormente por uma unidade de transformação, onde será feita a retificação dos valores de tensão e correntes geradas. A eletricidade é de seguida transportada, por meio de uma rede cabos de cobre revestidos estendidos junto solo marítimo e que se prolongam até à zona de costa. Na zona costeira, prevê-se a existência de um posto de transformação que fará a interligação entre a rede



elétrica marítima e a rede terrestre. Uma central elétrica poderá fazer o controlo da gestão de energia de acordo com as necessidades das populações. Desta forma poderá ser reduzido o recurso a fontes de energia não renováveis. Em caso de excesso de carga na rede, o que poderá ocorrer principalmente durante o período noturno, a energia poderá ser armazenada através do bombeamento de água para o enchimento de albufeiras. Esta interligação entre as várias formas de energia, permitirá responder as crescentes necessidades de energia de forma mais sustentável, contribuindo para a independência energética e maior respeito pelo ambiente.



Figura 64: “Redes Inteligentes”- Visão e estratégia para as redes elétricas futuras <sup>[0,22]</sup>.

#### 4.2.7 Estrutura superior.

Acoplado com a estrutura semi-submersa de apoio do flutuador está a estrutura que serve de apoio à caixa de velocidades e aos restantes componentes que constituem o sistema de transformação de energia.

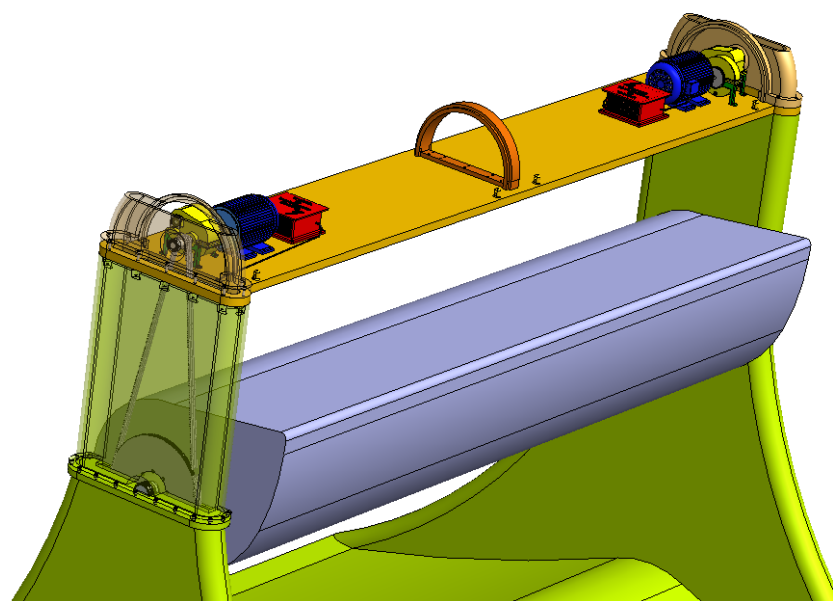


Figura 65: Vista estrutura de suporte dos mecanismos de conversão de energia.

Na parte superior da estrutura foram aplicadas duas portas concavas, que para além da proteção, possibilitam o acesso aos componentes mecânicos e elétricos que constituem o mecanismo, permitindo a realização de operações de manutenção.

Junto das extremidades superiores da estrutura, foi colocado um sistema de sinalização, permitindo servir de aviso de perigo de colisão para as embarcações que naveguem nas proximidades.

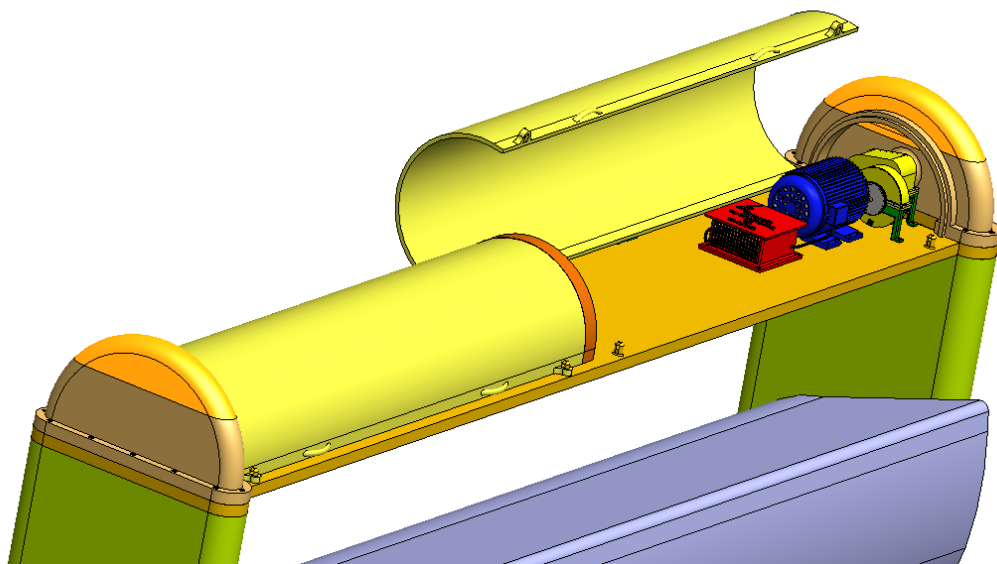


Figura 66: Vista das portas de acesso ao interior do mecanismo e das luzes de sinalização.

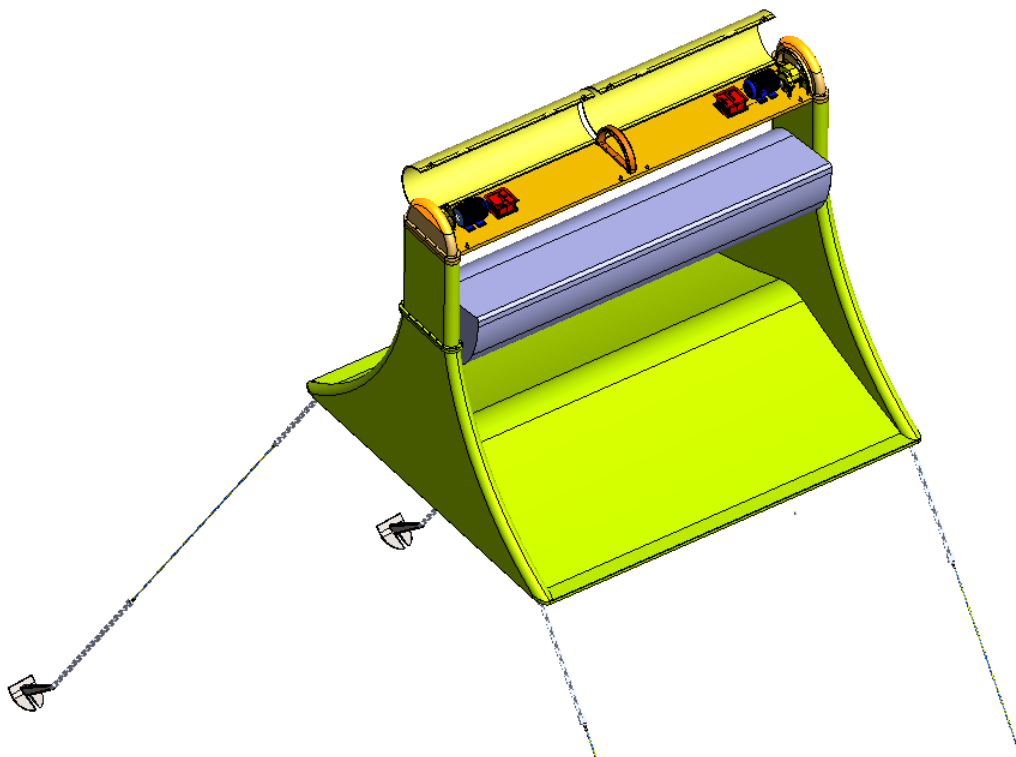


Figura 67: Desenho de conjunto do conversor de energia das ondas.

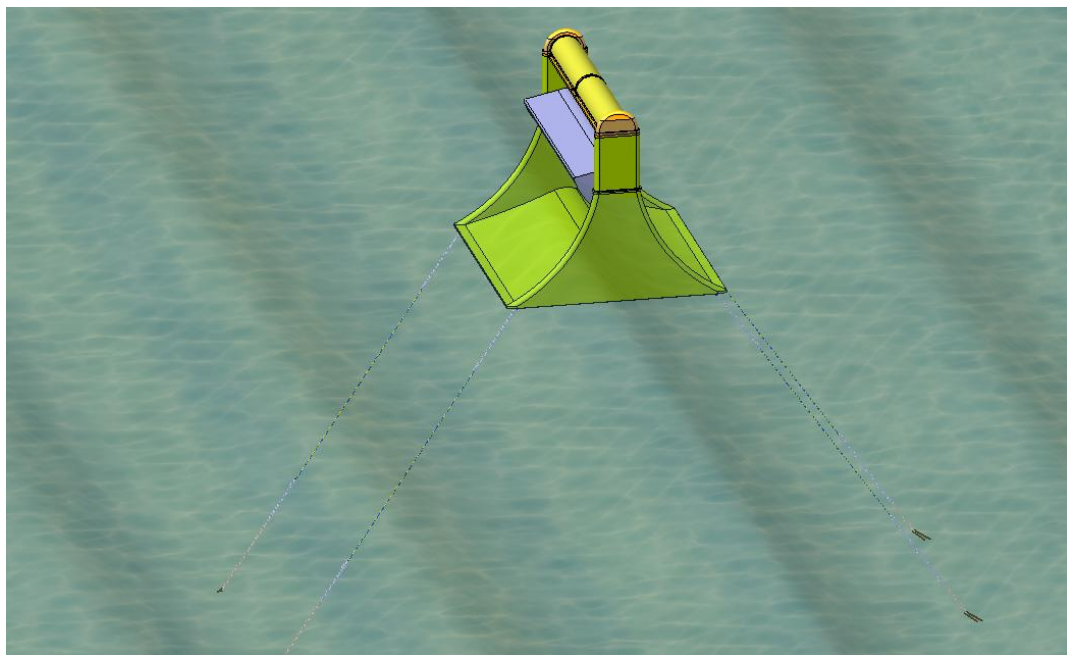


Figura 68: Modelo representativo do protótipo em ambiente marítimo.

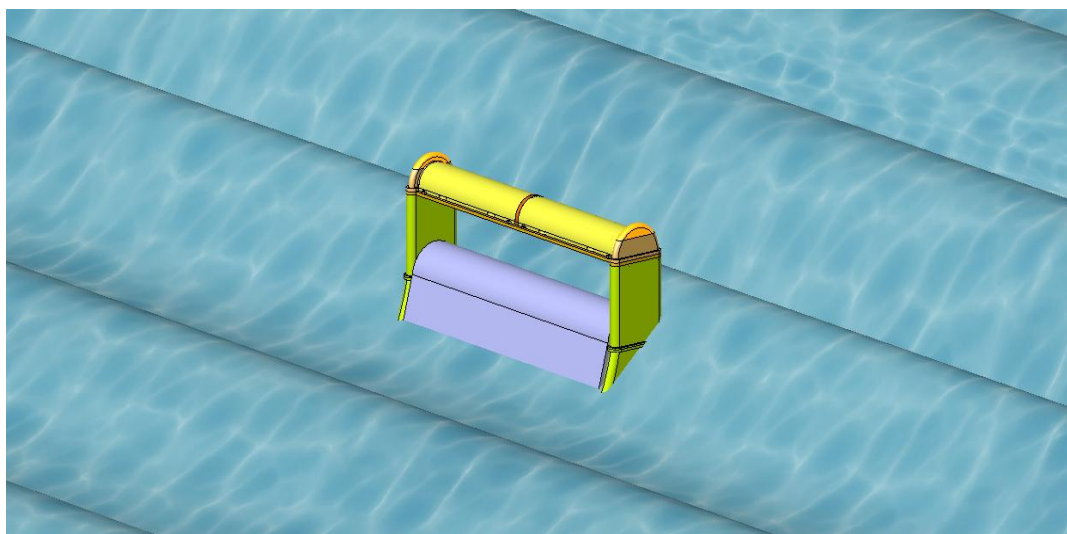


Figura 69: Fotorrealismo do protótipo em funcionamento.



## CAPÍTULO V

### 5 Perspetivas futuras de exploração do recurso energético em Portugal

*“A energia das ondas pode ser uma oportunidade para Portugal na era pós-eólica das renováveis se for feita uma aposta forte no desenvolvimento da tecnologia e não nos limitarmos, uma vez mais ao papel de importadores de equipamentos e utilizadores de tecnologia alheia” - António Falcão (IST).*

Portugal é um país de excelência no que toca ao recurso energético das ondas por várias razões:

Em primeiro lugar porque se situa numa zona classificada em termos de disponibilidade deste recurso energético de índice médio-alto (aproximadamente 40 kW/m, ver Figura 3). A zona costeira continental portuguesa tem aproximadamente 950 km de extensão, aos quais acrescem 691 km de costa do arquipélago dos Açores e 212 Km do arquipélago da Madeira. Tem águas profundas próximo da costa, fundos arenosos, correntes marítimas pouco significativas e condições meteorológicas favoráveis.

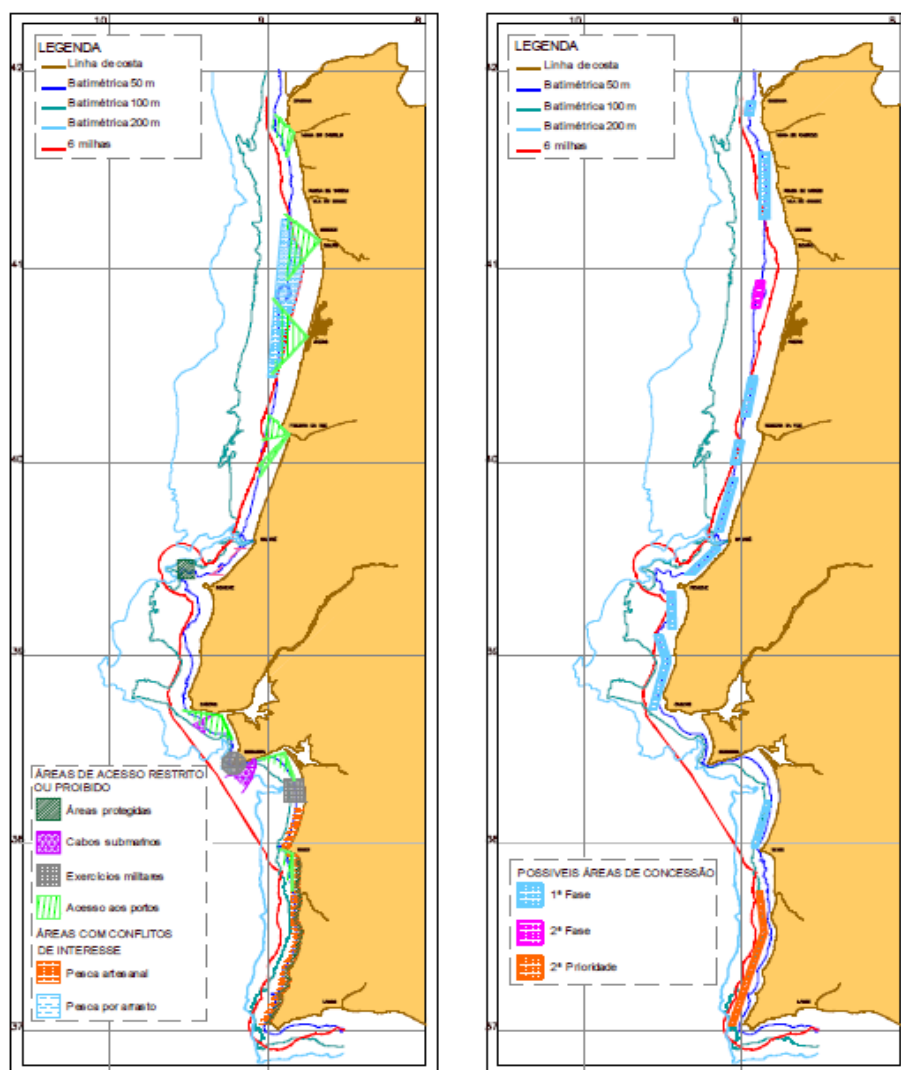


Figura 70: Zonas de acesso restrito (esquerda); Zonas de possíveis áreas de concessão (direita) <sup>[0.07]</sup>.

A elevada densidade populacional junto da zona litoral e a existência de uma rede de distribuição de eletricidade bem desenvolvida próximo da costa são igualmente fatores que beneficiam a exploração deste recurso.

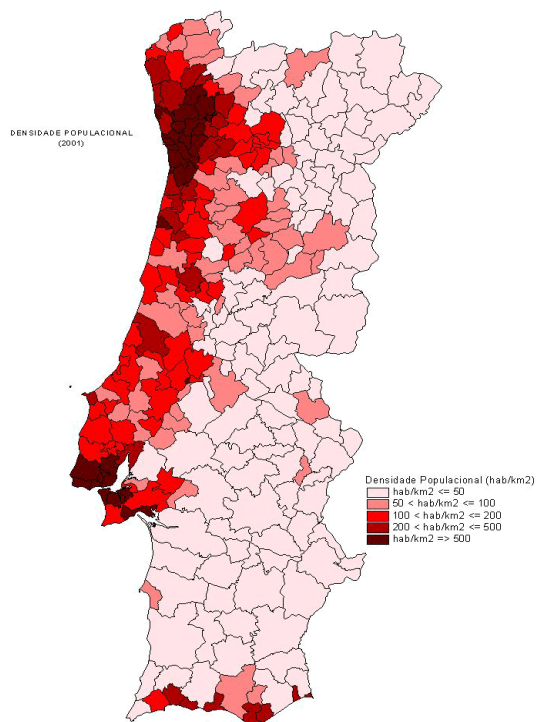
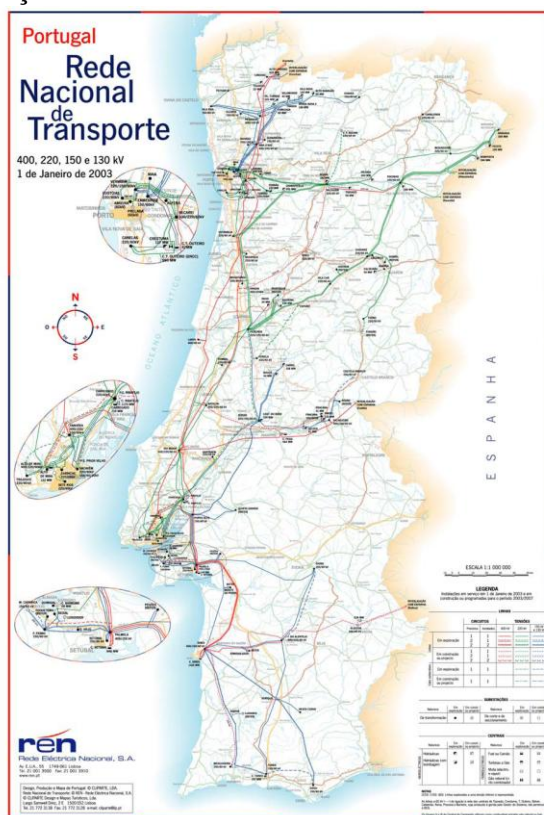


Figura 71: Mapa da rede elétrica Nacional (em cima); Mapa da densidade populacional portuguesa no ano 2001 (em baixo) <sup>[0.07] [0.23]</sup>.

Para além dos fatores apresentados, o conhecimento tecnológico e científico acumulado em mais de 30 anos de investigação e desenvolvimento nesta área, os apoios governamentais sob a forma de tarifa bonificada para a eletricidade produzida a partir da energia das ondas e as facilidades no que diz respeito a licenciamentos, com a criação de zonas piloto para a instalação de conversores de energia das ondas, fazem com que Portugal seja um país promissor e privilegiado para a exploração deste recurso.

Considerando uma futura fase de exploração do protótipo descrito neste trabalho na costa portuguesa, com base nos dados ondográficos das figuras 32 e 33, as quais mostram que a altura média da onda é de 2 m e o período de 7 segundos, e com base na tabela 2 verificamos que um protótipo projetado para estas condições, tem uma capacidade máxima teórica 17,58 kW/m.

Tendo em conta os 335 km de zona costeira continental delimitada para concessão de parques *offshore*, e que cerca de 20 % deste valor deverá ser utilizado como corredores marítimos para a navegação associada às pescas, resta uma extensão de 250 km possíveis para a instalação de conversores de energia. Nesta extensão de costa poderão ser instalados cerca de 12500 conversores de 20 m de comprimento, com uma potência total de aproximadamente 4,39 GW.

## **CAPÍTULO VI**

### **6.1 Conclusões Gerais**

Neste capítulo apresentam-se as conclusões gerais do trabalho desenvolvido, bem como as sugestões para os trabalhos futuros.

Com a elaboração do presente trabalho foi possível fazer uma revisão geral dos fenômenos que estão na origem da energia das ondas e dos modelos físicos e matemáticos que nos permitem interpretar e interagir sobre meio.

Partindo deste conhecimento, foi possível fazer uma filtragem dos pontos fortes e fracos dos mecanismos de extração de energia das ondas existentes, e dar um passo em frente na elaboração de um protótipo inovador.

As crescentes necessidades energéticas e os efeitos das alterações climáticas provocadas pelo consumo excessivo de combustíveis fósseis, levam a crer que a energia das ondas poderá ser uma alternativa promissora, permitindo a redução ou eliminação da atual dependência energética especialmente em países com elevada riqueza neste tipo de recurso.

### **6.2 Trabalhos Futuros**

Este trabalho foi o primeiro passo para o futuro desenvolvimento de um protótipo de testes para conversão de energia das ondas.

Como trabalhos futuros são seguidamente apresentados um conjunto de sugestões no sentido melhorar e desenvolver um sistema com a melhor performance possível.

- Com base nas peças modeladas, realizar simulações de fluidos que permitam perceber o comportamento hidrodinâmico da interação entre o fluido e a estrutura.
- Realizar simulações de esforços que permitam otimizar a forma construtiva do flutuador e da estrutura de suporte de modo a que os valores de tensão e de deformação não coloquem em causa a integridade do protótipo.
- Construir um modelo do flutuador que permita a realização de testes em ambiente controlado, com o intuito de encontrar uma solução exequível para a alteração da localização do centro de gravidade do flutuador, permitindo a adaptação do sistema a diferentes frequências de excitação.
- Construir e testar o protótipo em ambiente controlado, e seguidamente em ambiente natural.
- Atrair o interesse de investidores e promover a divulgação em empresas que possam trazer valor acrescentado para a melhoria contínua do projeto.

## REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA

### Livros

- [1] Cruz, João “Ocean Wave Energy Current Status and Future Perspectives ”, Springer, Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [2] Cruz, João, e Sarmiento, António “Energia das Ondas - Introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais”, Instituto do Ambiente, Alfragide, 2004.
- [3] McCormick, M. E, “Ocean Wave Energy Conversion,” John Wiley & Sons, New York, 2007.
- [4] Sorensen, Robert, “Basic Wave Mechanics: For Coastal and Ocean Engineers,” John Wiley & Sons, New York, 1993.
- [5] McCormick, M. E, “Ocean Engineering Wave Mechanics” Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, New York, 1973.
- [6] Branco, C., Moura; Ferreira, J., Martins; Costa, J., Domingos; Ribeiro, A., Silva, “Projecto de Órgãos de Máquinas”, Fundação Calouste Gulbenkian, Av. de Berna, Lisboa 2005.
- [7] Fernandes, Eduardo, Oliveira; Marques, Viriato, Soromenho; Pimenta, Carlos, “Energias Renováveis”, Atelier Nunes e Pã, 2009.
- [8] Morais, Alfredo, Balacó, “Apontamentos Teóricos de Sistemas Mecânicos”, Universidade de Aveiro, 2009.

### Sites

- [0.1] [www.aquaret.com](http://www.aquaret.com)
- [0.2] [www.oceanenergy.ie](http://www.oceanenergy.ie)
- [0.3] [www.pelamiswave.com](http://www.pelamiswave.com)
- [0.4] <http://www.aquamarinepower.com/>
- [0.5] <http://www.aw-energy.com>
- [0.6] <http://www.utilityweek.co.uk/news/uk/electricity/more-funding-for-wave-energy-t.php>
- [0.7] <http://cleantechnica.com/2009/10/18/reliable-wave-power-ensures-secure-terrorism-protection/>
- [0.8] <http://www.greencarcongress.com/2007/12/pge-and-finaver.html>
- [0.9] <http://science.howstuffworks.com/environmental/earth/oceanography/wave-energy2.htm>
- [0.10] <http://www.carnegiewave.com>
- [0.11] <http://www.awsocean.com>
- [0.12] <http://www.sintef.no/home/Information-and-Communication-Technology-ICT/Applied-Mathematics/Research-Areas/Simulation/Projects/Wave-power-plant/>
- [0.13] <https://www.planetseed.com/node/15265>

- [0.14] <http://www.global-greenhouse-warming.com/wave-dragon.html>
- [0.15] <http://cdip.ucsd.edu/?sub=index&nav=documents&xitem=gauge#buoys>
- [0.16] <http://www.hidrografico.pt/>
- [0.17] <http://www.renold.com/nmsruntime/saveasdialog.asp?IID=459&sID=828>
- [0.18] <http://multimediaprofesionales.iberdrola.es/En/Noticias/IBERDROLA,RENOVABLES,opens,wave,energy,plant,Santona,Cantabria,71.html>
- [0.19] <http://www.confagri.pt/Noticias/Pages/noticia33376.aspx>
- [0.20] [http://www.augustinefou.com/2011\\_04\\_03\\_archive.html](http://www.augustinefou.com/2011_04_03_archive.html)
- [0.21] <http://serc.carleton.edu/earthlabs/climate/5.html>
- [0.22] <http://www.smartgrids.eu/documents/vision.pdf>
- [0.23] [http://geog.no.sapo.pt/mapas\\_portugal.html#](http://geog.no.sapo.pt/mapas_portugal.html#)

## **Papers**

- [0.01] [http://www.iea-oceans.org/\\_fich/6/Newsletter\\_2\\_Sep2003.pdf](http://www.iea-oceans.org/_fich/6/Newsletter_2_Sep2003.pdf)
- [0.02] Luc Hamilton;. Awa MK II Deployment, monitoring and evaluation of a prototype advanced wave energy device. AWS Ocean Energy Ltd, October 2006.
- [0.03] Le-Ngoc, L; King, M; Gardiner, A., Initial Report on Wave Energy Conversion. Industrial Research Limited Report 86726/LL2, Christchurch, New Zealand. 2006
- [0.04] J. Falnes; “Principles for Capture of Energy from Ocean Waves”. Department of Physics, NTNU, Trondheim, Norway.
- [0.05] Wave Energy Center, “Potencial e Estratégia de Desenvolvimento de Energia das Ondas em Portugal “, Relatório 2004.
- [0.06] Centre for Renewable Energy Sources, “Ocean Energy Conversion in Europe-Recent advancements and prospect ”, Pikermi, Greece, 2006.“
- [0.07] Wave Energy Centre; “Potencial e Estratégia de Desenvolvimento da Energia das Ondas em Portugal”- Relatório 2004.
- [0.08] Carmichael, A. D., “An Experimental Study and Engineering Evaluation of the Salter Cam Wave Energy Converter”, Report No MITSG 78-22, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1978.

## **Programas Utilizados**

- [0.001] Google Earth
- [0.002] Solid Works 2011
- [0.003] Matlab 2007b

## **Apêndice I**

## Dimensionamento das engrenagens <sup>[8]</sup>.

Ao longo de uma oscilação completa da onda, o flutuador descreve um ângulo de aproximadamente  $90^\circ$  em torno do seu eixo de rotação. Partindo do princípio que o período de oscilação das ondas em estudo é de 5 segundos e que o flutuador oscila com uma frequência próxima da frequência de excitação, são necessárias 4 oscilações completas para que seja completado um ângulo equivalente a uma volta de  $360^\circ$ , ou seja 20 segundos. A velocidade de rotação do flutuador é então próxima dos 3 rpm, valor demasiado baixo para ser utilizado diretamente. Por este motivo torna-se necessária a utilização de um sistema de engrenagens para multiplicar a velocidade de entrada e corrigir o sentido de rotação bidirecional numa rotação unidirecional.

O primeiro andar de multiplicação é conseguido na transmissão por corrente de rolos que liga a cremalheira 'roda 0' solidamente acoplada com flutuador ao pinhão de entrada na caixa de velocidades.

Transmissão roda 0 /pinhão 1:

Características da ligação	Descrição
$B=0^\circ$	Ângulo de inclinação de dentado.
$Z_0=150$	Número de dentes da cremalheira.
$Z_1=19$	Número de dentes do pinhão 1
$u_{1-0}=7,89$	Relação de transmissão roda 0 - pinhão 1
$n_0= 3$	Rotação máxima da roda 0 em rpm
$n_1= 23,68$	Rotação máxima do veio 1 em rpm
$P=50,8$	Passo entre dentes [mm]
$b=145$	Espessura das rodas [mm]



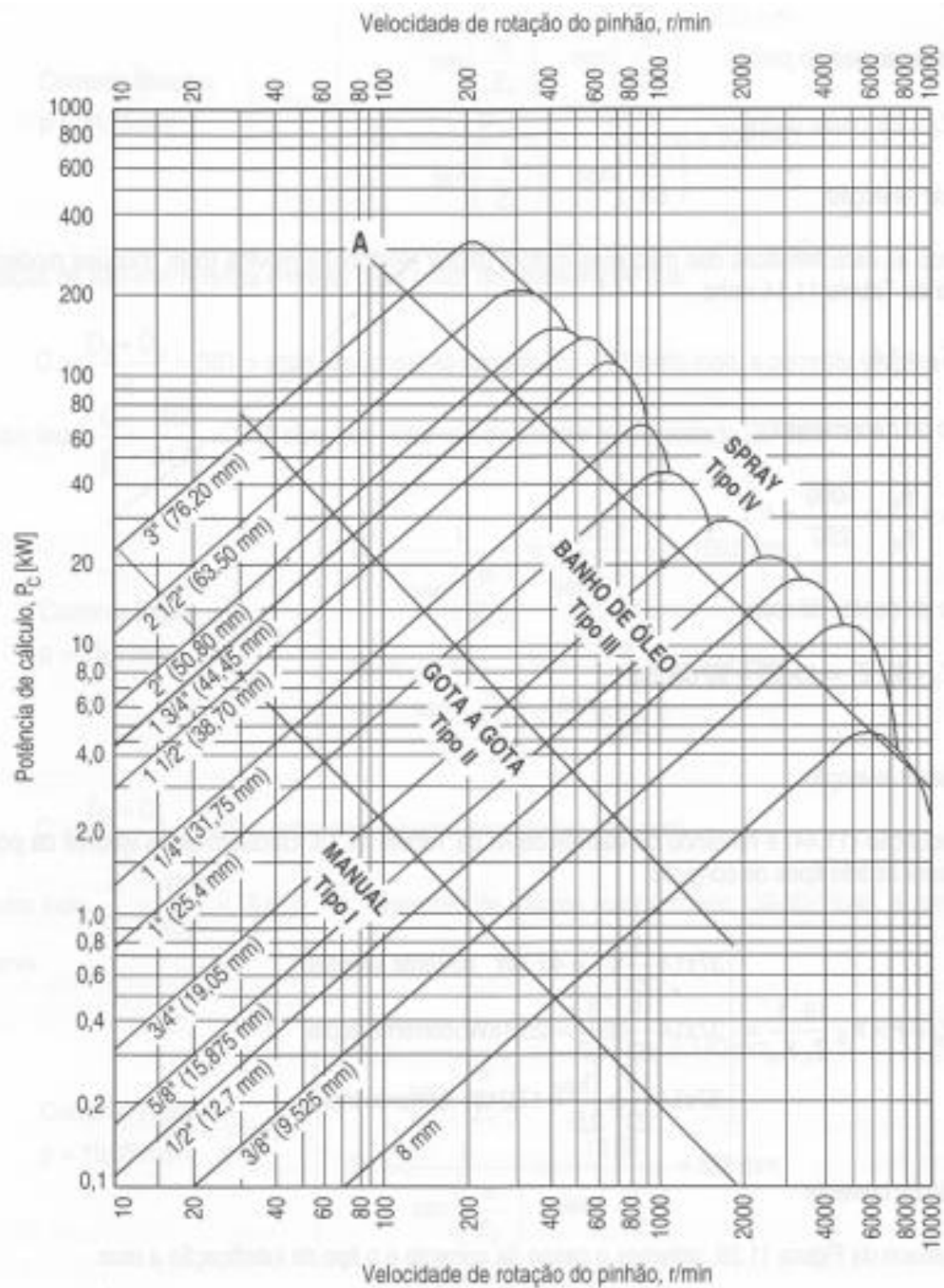
## Dimensionamento da corrente de rolos:

O dimensionamento da corrente de rolos foi baseado no modelo de anteprojeto descrito na bibliografia [6] e baseado em ábacos e catálogos de fabricantes.

Características da transmissão	Descrição
$P_d = 70537$	Potência disponível ao flutuador [W]
$Z_0 = 87$	Número de dentes da roda 0.
$Z_1 = 29$	Número de dentes do pinhão 1.
$U_{1-0} = 7,89$	Relação de transmissão roda 0- pinhão 1
$n_1 = 23,68$	Rotação máxima do veio 1 [rpm]
$K_s = 1.8$	Fator de serviço
$K_{1\_1} = 1$	Fator de tipo de corrente (corrente simples)
$K_{1\_2} = 1,7$	Fator de tipo de corrente (corrente dupla)
$K_{1\_3} = 2,5$	Fator de tipo de corrente (corrente tripla)
$P_{c1} = 35269$	Potência de cálculo para corrente simples [W]*
$P_{c2} = 20746$	Potência de cálculo para corrente dupla [W]*
$P_{c3} = 14107$	Potência de cálculo para corrente tripla [W]*
$L = 5760$	Entre-eixo [mm].
$p_1 = 76,2$	Passo para a corrente simples (valor retirado do ábaco 1)
$p_1 = 63,5$	Passo para a corrente dupla (valor retirado do ábaco 1)
$p_1 = 50,8$	Passo para a corrente tripla (valor retirado do ábaco 1)
$C_1 > 2050$	Condição de não interferência para corrente simples [mm]
$C_2 > 1709$	Condição de não interferência para corrente dupla [mm]
$C_3 > 1367$	Condição de não interferência para corrente tripla [mm]

\* Considerando que a transmissão será realizada por dois grupos de correntes.

Dado que o entre-eixo da transmissão é superior ao valor obtido para a condição de interferência, qualquer um dos três tipos de corrente poderia ser utilizado. Contudo tendo em consideração que os choques transmitidos são tanto maiores quanto maior for o passo da corrente, optou-se pela utilização da corrente tripla de passo 50.80mm, com o intuito de reduzir as vibrações transmitidas à caixa.



Ábaco 1: Capacidade de carga de correntes de rolos simples segundo a Norma BS288.

## Engrenagem 2-4

Característica da engrenagem 4-2	Descrição
$B=15^0$	Ângulo de inclinação de dentado.
$Z_2=87$	Número de dentes da roda 2.
$Z_4=29$	Número de dentes da roda 4.
$u_{2-4}=3$	Relação de transmissão roda 2-roda 4
$n_1=23,68$	Rotação máxima do veio 1 [rpm]
$n_3=71,04$	Rotação máxima do veio 3 [rpm]
$m_n=8$	Módulo normal.
$m_t=8,2822$	Módulo tangencial.
$r_4=120,1$	Raio nominal da roda 4 [mm].
$v_t=0,8934$	Velocidade tangencial da roda 4 [m/s].
$C_b=15$	Razão entre a largura da roda e o módulo normal.
$b=120$	Espessura da roda.
$K_A=1,25$	Factor de aplicação de carga.
$N=7,4677 \times 10^8$	Número de ciclos pretendidos (considerando um período de utilização de 20 anos à velocidade de rotação máxima).
$Z_N=0,9203$	Factor de duração (para roda em aço temperado).
$K_B=1,4757$	Factor de serviço.
$C_2=0,27$	Factor de resistência.
$C_3=0,902$	Factor de efeitos dinâmicos.
$C_4=0,8281$	Factor de distribuição de carga.
$C_5=39,8892$	Factor de resistência (Dureza da roda 55 HRC).
$C_6=1$	Factor de desgaste, considerando endurecimento superficial
$K_{adm}=5,4513$	Factor de resistência.
$P_{adm}=105,27$	Potência admissível pela engrenagem 4-2 [kW].

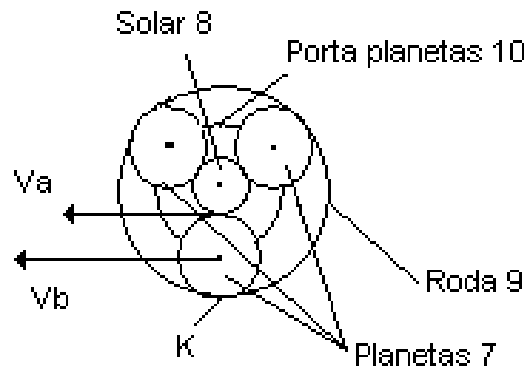
## Engrenagem 3-5

Característica da engrenagem 3-5	Descrição
$B=15^0$	Ângulo de inclinação de dentado.
$Z3=82$	Número de dentes da roda 3.
$Z5=41$	Número de dentes da roda 5.
$u_{3-5}=2$	Relação de transmissão roda 3-roda 5
$n1=23,68$	Rotação máxima do veio 1 [rpm]
$n2=47,36$	Rotação máxima do veio 2 [rpm]
$mn=8$	Módulo normal.
$mt=8,2822$	Módulo tangencial.
$R5=169,8$	Raio nominal da roda 5 [mm].
$vt=0,84$	Velocidade tangencial da roda 5 [m/s].
$Cb=15$	Razão entre a largura da roda e o módulo normal.
$b=120$	Espessura da roda.
$KA=1,25$	Factor de aplicação de carga.
$N=4,978483 \times 10^8$	Número de ciclos pretendidos (considerando um período de utilização de 20 anos à velocidade de rotação máxima).
$ZN=0,9319$	Factor de duração (para roda em aço temperado).
$KB=1,4394$	Factor de serviço.
$C2=0,27$	Factor de resistência.
$C3=0,8988$	Factor de efeitos dinâmicos.
$C4=0,8438$	Factor de distribuição de carga.
$C5=39,8892$	Factor de resistência (Dureza da roda 55 HRC).
$C6=1$	Factor de desgaste, considerando endurecimento superficial
$K_{adm}=5,6749$	Factor de resistência.
$P_{adm}=129,81$	Potência admissível pela engrenagem 3-5 [kW].

## Engrenagem 5-6

Característica da engrenagem 5-6	Descrição
$B=15^0$	Ângulo de inclinação de dentado.
$Z_5=41$	Número de dentes da roda 5.
$Z_6=27$	Número de dentes da roda 6.
$u_{5-6}=1,5$	Relação de transmissão roda 5-roda 6
$n_2=47,36$	Rotação máxima do veio 2 [rpm]
$n_3=71,04$	Rotação máxima do veio 3 [rpm]
$m_n=8$	Módulo normal.
$m_t=8,2822$	Módulo tangencial.
$r_6=111,8$	Raio nominal da roda 6 [mm].
$v_t=0,8255$	Velocidade tangencial da roda 6 [m/s].
$C_b=15$	Razão entre a largura da roda e o módulo normal.
$b=120$	Espessura da roda.
$K_A=1,25$	Factor de aplicação de carga.
$N=7,4693 \times 10^8$	Número de ciclos pretendidos (considerando um período de utilização de 20 anos à velocidade de rotação máxima).
$Z_N=0,8930$	Factor de duração (para roda em aço temperado).
$K_B=1,5674$	Factor de serviço.
$C_2=0,27$	Factor de resistência.
$C_3=0,9022$	Factor de efeitos dinâmicos.
$C_4=0,8234$	Factor de distribuição de carga.
$C_5=62,32$	Factor de resistência (Dureza da roda 60 HRC).
$C_6=1$	Factor de desgaste, considerando endurecimento superficial
$K_{adm}=7,9765$	Factor de resistência.
$P_{adm}=106,84$	Potência admissível pela engrenagem 5-6 [kW].

Dimensionamento do planetário.



A roda 9 está fixa e o ponto K é o centro instantâneo de rotação do planeta 7, como tal podemos escrever:

$$v_a = w_8 \times r_8 = w_7 \times 2r_7 \Leftrightarrow w_7 = \frac{w_8 \times r_8}{2r_7}$$

$$v_b = w_7 \times r_7 = w_{10} \times r_{10} \Leftrightarrow w_7 \times r_7 = w_{10} \times (r_8 + r_7) \Leftrightarrow w_7 = \frac{w_{10} \times (r_8 + r_7)}{r_7}$$

Conjugando as duas equações:

$$\frac{w_8 \times r_8}{2r_7} = \frac{w_{10} \times (r_8 + r_7)}{r_7} \Leftrightarrow w_8 = \frac{w_{10} \times (r_8 + r_7) \times 2}{r_8}$$

$$w_8 = \frac{w_{10} \times (r_8 + 3r_8) \times 2}{r_8} \Leftrightarrow w_8 = 8 \times w_{10} = 568,32 [rpm]$$

Para uma relação de transmissão  $u_{7-8}=3$  temos:

Características da engrenagem 8-9	Descrição
B=0	Ângulo de inclinação de dentado (dentado recto)
Z8=19	Número de dentes do solar 8
Z7=57	Número de dentes do planeta 7
n4=568,32	Rotação máxima do veio 4
mn=6	Módulo normal
r8=57	Raio nominal do solar [mm]
vt=3,3923	Velocidade tangencial do solar [m/s]
Cb=10	Razão entre a largura da roda e o módulo normal.
b=60	Espessura da roda
KA=1,25	Factor de aplicação de carga

N=5.9742e+009	Número de ciclos de vida pretendidos para o solar (considerando um período de utilização de 20 anos à velocidade de rotação máxima).
ZN=0,8634	Factor de duração (roda em aço temperado)
KB=1,6767	Factor de serviço
C2=0,27	Factor de resistência
C3=0.9220	Factor de efeitos dinâmicos
C4=0,8343	Factor de distribuição de carga
C5=39,8892	Factor de resistência (para uma roda com dureza 55 HRC)
C6=1	Factor de desgaste
Kadm=4,9410	Factor de resistência
u7-8=3	Relação de transmissão da engrenagem 7-8
Padm=85.98	Potência admissível pela engrenagem 7-8 [kW]

$$R9 = R8 + 2 \times R7 = 57 + 2 \times (3 \times 57) = 399[mm]$$

$$Z9 = \frac{2 \times 399}{6} = 133$$

## Apêndice II



```

%-----
%Ficheiro Matlab: Energia Cinética e Energia Potencial da onda
%Realizado por: Paulo Calejo
%Data: Setembro de 2011
%-----

    %Definição dos parâmetros da onda
    %-----

H=2; % Altura da onda [m]
T=7; % Período da onda [s]
g=9.81; % Aceleração da gravidade [m/(s^2)]
ro=1030; %Densidade da água do mar [kg/m^3]
L=1;% Largura da onda
d=50; %Profundidade do mar [m]
%*****
Lam=(g*T^2)/(2*pi); %Comprimento de onda [m]
c=(g*T)/(2*pi); %Velocidade de propagação da onda [m/s]
w=2*pi/T; %Frequência angular da onda [rad/s]
k=2*pi/Lam; %Número de onda

%*****
%Equação da representativa da superfície da onda

x=[0:100/99:100];
n=H/2.*cos(k.*x-w*T);%Perfil da superfície de água deslocada

%Energia potencial da onda
m=ro.*(100/99).*n; % Massa de água acima do nível médio do mar
EP=m.*g.*n./2; %Energia Potencial da Onda
subplot(2,2,1),plot(x,1000.*n,'g',x,EP,'b')
Title('Forma da onda//Energia potencial')
xlabel('Posição horizontal [m]')
legend('Amplitude da onda [mm]','Energia potencial [J]')

%Energia cinética da onda
z=[0:-d/(d-1):-d];
EC=2*((ro*w^2*(H/2)^2)/(4*k)).*(1-exp(2.*k.*z));
subplot(2,2,2),plot(EC,z,'g')
Title('Energia cinética acumulada em função da profundidade')
xlabel('Energia Cinética [J]')
ylabel('Profundidade [m]')

%*****
%*****

```

```

%-----
%Ficheiro Matlab: Dimensionamento do Flutuador
%Realizado por: Paulo Calejo
%Data: Setembro de 2011
%-----
%Características gerais

T=5;% Período da onda [s]
H=1;% Altura da onda [m]
g=9.81; % Aceleração da gravidade [m/s2]
ro=1030; % Densidade da água do mar [Kg/m3]
Lam=(g*T^2)/(2*pi);% Comprimento de onda [m]
k=2*pi/Lam;% Número de onda
rad=180/pi; %Conversão de radianos para graus

%-----

R2=Lam/20; % Raio Stern do duct [m]
Kd= 0.0937*Lam; % Constante de design;
z=0; % Profundidade a que está o flutuador [m]
Ro=Kd*exp((2*pi*z)/Lam); % Raio do paunch profile [m]
RD=1*Ro; %Dimensão característica do flutuador [m]
rd=0.226*RD; % Raio do centro de massa[m]

Ld=sqrt(RD^2-R2^2); % Comprimento plano do flutuador [m]
Angulo=acos(Ld/RD)*rad;%Ângulo do centro de massa do flutuador [grau]
Roo=1.5*R2;%Dimensão característica do flutuador [m]
oo=R2/2; % Localização do centro geométrico do raio Roo
B=20; % Largura do flutuador aproximadamente igual a 10 vezes R2.[m]

%*****

%Massa de água deslocada

A1=pi*(R2^2)/2; % Área elementar 1
A2=0.222*pi*(Roo^2);% Área elementar 2
A3=0.5*(Roo^2)*sin(10/rad)*(cos(10/rad)+tan(10/rad));% Area elementar 3
A4=R2*Ld/2;% Área elementar 4
A5=((Roo^2)*tan(10/rad))/(8^2);% Área elementar 5
Area=A1+A2+A3+A4-A5;% Área do flutuador em contacto com a água [m2]

Volume=Area*B; % Volume do flutuador [m3]
M=ro*Volume;% Massa de agua deslocada [kg]

%*****

% Frequência de oscilação do sistema

f1=(1/3)*ro*g*(Ld^3)*B-M*g*rd*sin(Angulo/rad);
f2=2*((1/32)*pi*ro*B*((Ld/(cos(Angulo/rad)))^2-R2^2)^2);
ft=(1/(2*pi))*sqrt(f1/(f2));%Frequência de oscilação do sistema [Hz]
t=1/f; % Periodo de oscilação do sistema [s]
wz=2*pi*f; % Frequência angular do sistema [rad/s]

%*****

```

```

%*****
    % Energia da Onda

Ep=ro*g*H^2*Lam*B/16; %Energia potencial da onda = Energia cinética [J]
E=2*Ep; %Energia total da onda [J]
c=Lam/T; %Velocidade de propagação da onda [m/s]
cg=c/2; %Grupo de velocidade da onda para águas profundas h>=Lam/2
Pot=ro*g*H^2*cg*B/8; %Potência da onda [W]

%*****
    % Potência disponível ao flutuador em função da sua dimensão

d=2*R2;% Altura submersa do flutuador [m]
PD=(ro*g*H^2*c*B/16)*(1-exp(-2*k*d)) %Potência disponível ao flutuador (W)

    % Rendimento do flutuador

Rend=PD/Pot; % Rendimento máximo disponível ao flutuador
n=0.89;% Rendimento de conversão de energia do flutuado segundo Salter
PDn= PD*n; % Potência de conversão máxima do flutuador (W)

Freq_Adimensional=(2*pi/t)*sqrt(R2/g);%Frequência adimensional do flutuador

%*****
%*****

```